

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BULANIK SONUÇLANDIRMA TABANLI GÜÇ FİLTRESİ VE DİNAMİK
GERİLİM REGÜLATÖRÜNÜN BİR FAZLI MİKRO RÜZGAR GÜÇ ÜRETİM
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Müh. Kenan YANMAZ

**EYLÜL 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BULANIK SONUÇLANDIRMA TABANLI GÜÇ FİLTRESİ VE DİNAMİK
GERİLİM REGÜLATÖRÜNÜN BİR FAZLI MİKRO RÜZGAR GÜÇ ÜRETİM
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

Elektrik Elektronik Mühendisi Kenan YANMAZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Elektronik Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.09.2010

Tezin Savunma Tarihi : 27.09.2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Cemil GÜRÜNLÜ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Murat EKİNCİ

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans programı çerçevesinde gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, rüzgar türbinlerinde yüke aktarılan gücün kalitesini artırmak için bir Dinamik Voltaj Regülatörü/Anahtarlama Güç Filtresi (DVR/AGF) önerilmiştir. Ve bu DVR/AGF'nin kontrolü için üç çevrimli dinamik hata toplamına bağlı bir denetleyici geliştirilmiştir. Üç çevrimli dinamik hata toplayıcısı klasik PI ve Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) ile birlikte kullanılarak DVR/AGF için gerekli anahtarlama sinyalleri üretilmiş ve iletilen gücün kalitesinde iyileştirmeler sağlanmıştır.

Öncelikle bu çalışmam esnasında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'a vermiş olduğu destekten dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmanın amacına ulaşması için değerli fikirlerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Adel M. SHARAF (Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, New Brunswick Üniversitesi, Kanada) hocama da çok teşekkür ederim.

Ayrıca lisans eğitimimden bu yana üzerimde emeği olan Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümündeki bütün hocalarıma bu vesileyle teşekkür ederim.

İhtiyaç duyduğumda benden bilgisini esirgemeyerek vermiş olduğu maddi ve manevi her türlü destekten dolayı arkadaşım Öğr. Gör. Onur Özdal MENGİ'ye en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, beni bugüne kadar yalnız bırakmayan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sevgili babam Yüksel YANMAZ'a, sevgili annem Ayşe YANMAZ'a, kardeşlerim Tahsin YANMAZ ve Altan YANMAZ'a, sevgili eşim Ebru YANMAZ'a ve sabrından dolayı kızım Yaren YANMAZ'a bu vesileyle sevgi ve saygılarımı sunarım.

Kenan YANMAZ

Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Rüzgar Türbini.....	5
1.3.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	6
1.3.1.1. Yapılarına Göre Rüzgar Türbinleri.....	6
1.3.1.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	6
1.3.1.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	7
1.3.1.2. Güçlerine Göre Rüzgar Türbinleri.....	7
1.3.1.2.1. Mikro Türbinler	7
1.3.1.2.2. Küçük Güçlü Rüzgar Türbinleri	7
1.3.1.2.3. Orta Güçlü Rüzgar Türbinleri.....	8
1.3.1.2.4. Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri	8
1.3.1.3. Şebeke Açısından Rüzgar Türbinleri.....	9
1.3.1.3.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler.....	9
1.3.1.3.2. Şebekeye Bağımlı Sistemler	10
1.3.2. Rüzgar Gücü	11
1.3.3. Türbin Gücü.....	13
1.3.4. Basınç Katsayısı C_p 'nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi	13
1.3.5. Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Güç Yapısı.....	15
1.3.6. Rüzgar Türbininin Kısımları	17

1.3.6.1.	Kanatlar ve Kuyruk	18
1.3.6.2.	Kule	19
1.3.6.3.	Rotor	19
1.3.6.4.	Vites Kutusu	20
1.3.6.5.	Eğim Donanımı	20
1.3.6.6.	Fren Sistemi	20
1.3.6.7.	Elektriksel Aksamlar	21
1.3.6.7.1.	Generatör	21
1.3.6.7.2.	Doğrultucu ve Gerilim Düzenleyici	21
1.3.6.7.3.	Akü	22
1.3.6.7.4.	Evirici	22
1.4.	Asenkron Makina	22
1.4.1.	Genel Bilgiler	22
1.4.2.	Asenkron Generatör	27
1.4.2.1.	Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)	28
1.4.2.2.	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)	30
1.4.3.	Sincap Kafesli Asenkron Makinanın Matematiksel Modeli	30
1.4.4.	Sincap Kafesli Asenkron Makinanın d–q Eksen Takımı Modeli	33
1.5.	Kontrol Sistemleri	35
1.5.1.	Açık Çevrimli Kontrol Sistemleri	36
1.5.2.	Kapalı Çevrimli Kontrol Sistemleri	36
1.5.3.	PID Denetleyiciler	37
1.6.	Bulanık Mantık	38
1.6.1.	Üyelik Fonksiyonları	39
1.6.1.1.	Üçgen Biçimli Üyelik Fonksiyonu	39
1.6.2.	Bulanık Mantık Denetleyici (BMD)	40
1.6.2.1.	Bulanık Kontrole Giriş	40
1.6.2.2.	Bulanık Önergeler	41
1.6.2.3.	Bulanık İşlemcinin Kısımları	41
1.6.2.3.1.	Bulanıklaştırma Bloğu	42
1.6.2.3.2.	Bulanık Kural Tabanı	42
1.6.2.3.3.	Bulanık Sonuçlandırma	43
1.6.2.3.4.	Durulaştırma Bloğu	44

1.7.	Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM).....	45
1.7.1.	Gerilim Kontrollü DGM.....	48
1.7.1.1.	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM).....	48
1.7.2.	Akım Kontrollü DGM	51
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	52
2.1.	Sistemin Ana Yapısı	52
2.2.	Sistem Denetimi	58
2.3.	Anahtarlama Kontrol Algoritması	59
2.3.1.	Üç Çevrimli Hata Toplayıcı	60
2.3.2.	Denetleyiciler.....	62
2.3.2.1.	PI Denetleyici	62
2.3.2.2.	Bulanık Mantık Denetleyici	62
2.4.	Sistemde Kullanılan Yükler	67
3.	BULGULAR	68
4.	TARTIŞMA.....	80
5.	SONUÇLAR.....	81
6.	ÖNERİLER	82
7.	KAYNAKLAR.....	83
Ek 1.	87
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Dünyada artan enerji ihtiyacı nedeniyle insanlar farklı kaynak arayışlarına girmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu ihtiyacı gidermede üzerinde en çok durulan enerji kaynaklarından biridir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisi de rüzgardan enerji üretimidir. Rüzgar türbin teknolojisi gün geçtikçe hızla gelişmektedir.

Rüzgarın sürekli aynı kararlılıkta olmaması, hızının değişmesi, tüketici tarafındaki yüklerin değişken olması ve doğrusal olmayan yükler kullanılması nedenleriyle, rüzgar türbinlerinden yüklere iletilen güç, hat boyunca iletim ve dağıtım sırasında gerilim dalgalanmalarından çok fazla etkilenmektedir. Asenkron generatörlerin yapılarından dolayı, güç transferinde rüzgar hız değişimlerinin etkisini azaltmak için rüzgar güç sistemlerinde uygun kontrolörler kullanılarak farklı hızlarda aynı güç üreten generatör tipleri tercih edilir. Ancak, tek başına asenkron generatör, çeviricilerin ve anahtarlama tipli yüklerin sebep olduğu güç, frekans ve gerilim dalgalanmalarını ve harmonikleri azaltmak için yetersizdir.

Bu tezde, yukarıda tanımlanan hem güç kalitesi hem de gerilim kararlılığı problemlerini gidermek için bir Dinamik Voltaj Regülatörü/Anahtarlama Güç Filtresi (DVR/AGF) önerilmiştir. Bu DVR/AGF'nin yanında, filtreleme kontrol işleminde kullanılan yeni dinamik üç çevrimli hata toplamına bağlı bir denetleyici yapısı önerilmiştir. Daha sonra bu toplam dinamik hata sinyali, yüksek güç kalitesi, sabit frekans ve gerilim seviyesi için istenilen kriterleri yerine getirmek amacıyla bir Modifiye edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici (MBMD) kullanılarak en aza indirgenir. MBMD'nin performansı, klasik PI türü denetleyici kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Geliştirilen DVR/AGF ve dinamik hata çevrimli PI ve BMD, MATLAB/SIMULINK Simpower ortamında modellenerek benzetimler yapılmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen filtre ve denetleyicilerin performansını doğrulamak için değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi, Güç Kalitesi, Bulanık Mantık Denetleyici, Dinamik Voltaj Regülâtörü, Anahtarlama Güç Filtresi, Üç Çevrimli Hata Toplayıcı.

SUMMARY

Application of Fuzzy Reasoning Based Power Filter and Dynamic Voltage Regulator for Single Phase Micro Wind Power Generation Systems

Because of the increasing energy demanding in the world, the people began to search for the new energy sources. Renewable energy sources are the most emphasized one to obviate this energy demanding. The energy production from the wind is one the most important renewable energy sources. The wind turbine technology develops rapidly.

By the reasons like the instability of the wind force, changes in wind speed, variations in load demands, and the use of nonlinear load types, the power transmitted from wind turbine to the load get affected very much besides the voltages oscillations at various busses along the transmission and distribution power lines. Due to the ability of induction generators generating the same power at different speeds by using proper controllers, these types of generators are preferred in wind power systems in order to reduce the effects of the wind speed changes on the power transferred. However, the induction generator itself is not sufficient to eliminate or reduce the power, frequency and voltage oscillations and the harmonics caused by the switched type loads and converters.

In this thesis, a Dynamic Voltage Regulator/Switched Power Filter (DVR/SPF) is proposed to overcome both power quality and voltage stability problems described above. Beside the DVR/SPF a novel dynamic three loop error driven control structure is also proposed to be used in the filter control process. The total dynamic error signal is then minimized by using a modified fuzzy logic controller (MFLC) to meet the criteria's required for high power quality, stable frequency and voltage levels. The performance of the MFLC is verified by comparing the results obtained using classical proportional plus integral (PI) controller.

The proposed DVR/SPF, dynamic three error driven loops, PI and MFLC are modeled and simulated in MATLAB/SIMULINK Simpower environment. The simulation results are evaluated for the performance verification of the proposed filter and controllers.

Key Words: Wind Energy, Power Quality, Fuzzy Logic Controller, Dynamic Voltage Regulator, Switched Power Filter, Tri Loop Driven Error Signal Generator.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Sistemin tek hat şeması	2
Şekil 1.2. Yatay eksenli sistem.....	6
Şekil 1.3. Düşey eksenli sistem	7
Şekil 1.4. Şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgar türbini	9
Şekil 1.5. Şebekeden bağımsız akü şarj prensibine göre çalışan rüzgar türbini.....	10
Şekil 1.6. Şebekeyle paralel bağlı rüzgar türbini.....	10
Şekil 1.7. Rüzgar akışı ve spesifik hız değerleri.....	11
Şekil 1.8. Basınç katsayısı C_p 'nin tepe hızı oranı λ ve pitch açısı β ile değişimi	14
Şekil 1.9. Rüzgar türbininin arzu edilen güç yapısı.....	16
Şekil 1.10. Rüzgar türbin karakteristiği.....	17
Şekil 1.11. Bir rüzgar türbininde bulunan bazı aksamalar	18
Şekil 1.12. Asenkron makinanın Moment-Hız/Kayma karakteristiği	26
Şekil 1.13. Tipik rüzgar türbini konfigürasyonları	28
Şekil 1.14. Açık çevrimli kontrol sistemlerinin öğeleri.....	36
Şekil 1.15. Kapalı çevrimli kontrol sistemi	37
Şekil 1.16. PID denetimli kontrol sistemi.....	37
Şekil 1.17. Üçgen biçimli üyelik fonksiyonu	40
Şekil 1.18. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı	42
Şekil 1.19. Mamdani sonuçlandırma metodu	44
Şekil 1.20. Durulaştırma işlemi	45
Şekil 1.21. Darbe genişlik modülasyonu (DGM).....	46
Şekil 1.22. Gerilim kontrollü DGM blok şeması	48
Şekil 1.23. SDGM kontrol blok şeması.....	49
Şekil 1.24. SDGM işaretleri üretilmesi ve oluşan çıkış işareti.....	50
a) Sinüs referansı maksimum genliğe sahip	50
b) Sinüs referansı yarı genliğe sahip.....	50
c) Sinüs referansı yarı genliğe ve yarı frekansa sahip	50
Şekil 2.1. Sistemin tek hat şeması	52
Şekil 2.3. Sistemin blok diyagramı.....	55

Şekil 2.4.	S1anahtarı açık, S2 anahtarı kapalı konumda iken sistemin blok diyagramı...	58
Şekil 2.5.	S1anahtarı kapalı, S2 anahtarı açık konumda iken sistemin blok diyagramı...	59
Şekil 2.6.	Anahtarlama sinyallerinin üretildiği alt sistem	59
Şekil 2.7.	Üç çevrimli hata toplayıcı	60
Şekil 2.8.	Üç çevrimli hata toplayıcının Matlab/Simulink modeli.....	61
Şekil 2.9.	Kullanılan üçgen üyelik fonksiyonları	63
Şekil 2.10.	Bulanıklaştırma işleminin simulink modeli	64
Şekil 2.11.	Kuralların işlendiği kısım.....	65
Şekil 2.12.	Durulaştırma işleminin simulink modeli.....	66
Şekil 2.13.	Giriş ve çıkış değişkenleri ile BMD.....	66
Şekil 3.1.	Rüzgar hızı değişimi.....	68
Şekil 3.2.	PI denetleyicili benzetimde B1 barası geriliminin etkin değeri	69
Şekil 3.3.	PI denetleyicili benzetimde B1 barası gerilimin dalga şekli	69
Şekil 3.4.	PI denetleyicili benzetimde B1 barasındaki aktif gücün değişimi	70
Şekil 3.5.	PI denetleyicili benzetimde B1 barasındaki reaktif gücün değişimi	70
Şekil 3.6.	PI denetleyicili benzetimde B3 barası geriliminin etkin değeri	71
Şekil 3.7.	PI denetleyicili benzetimde B3 barası akımın etkin değeri.....	71
Şekil 3.8.	PI denetleyicili benzetimde Yük tarafında çekilen aktif güç	72
Şekil 3.9.	PI denetleyicili benzetimde Yük tarafında reaktif güç durumu	72
Şekil 3.10.	PI denetleyicili benzetimde DVR/AGF bloğunda anahtarlama	73
Şekil 3.11.	PI denetleyicili hata değişimi	73
Şekil 3.12.	BMD'li benzetimde B1 barası geriliminin etkin değeri.....	74
Şekil 3.13.	BMD'li benzetimde B1 barası gerilimin dalga şekli.....	74
Şekil 3.14.	BMD'li benzetimde B1 barasındaki aktif gücün değişimi.....	75
Şekil 3.15.	BMD'li benzetimde B1 barasındaki reaktif gücün değişimi.....	75
Şekil 3.16.	BMD'li benzetimde B3 barası geriliminin etkin değeri.....	76
Şekil 3.17.	BMD'li benzetimde B3 barası akımın etkin değeri.....	76
Şekil 3.18.	BMD'li benzetimde Yük tarafında çekilen aktif güç	77
Şekil 3.19.	BMD'li benzetimde Yük tarafında reaktif güç durumu	77
Şekil 3.20.	BMD'li benzetimde DVR/AGF bloğunda anahtarlama.....	78
Şekil 3.21.	BMD hata değişimi	78
Şekil 3.22.	PI ve BMD ile B3 barasının etkin değerinin değişimi	79
Şekil 3.23.	Sistemde DVR/AGF bloğu yokken B3 barası geriliminin etkin değeri.....	79

Ek Şekil 1. Sincap kafesli tek fazlı asenkron generatörün bağlantı şeması.....	87
Ek Şekil 2. Asenkron generatörün eşdeğer devresi	89

SEMBOLLER DİZİNİ

P	: Statorun toplam kutup sayısı
f_s	: Uygulanan gerilimin frekansı
n_s	: Statorun devir/dakika (d/d) cinsinden senkron hızı
ω_s	: Stator hızının açısal hız cinsinden eşiti
n_r	: Asenkron motorun rotor hızı
ω_r	: Rotor hızının açısal hız cinsinden eşiti
s	: Stator ile rotor arasındaki kayma
f_s	: Stator frekansı
f_r	: Rotor frekansı
E_s	: Stator sargılarında endüklenen gerilim
E_r	: Rotor sargılarında endüklenen gerilim
a	: Dönüştürme oranı
S_g	: Görünür güç
P_g	: Aktif güç
Q_g	: Reaktif güç
φ	: Faz açısı
m	: Kütle
A_x	: Kontrol hacmi
u	: Akış hızı
A	: Rotor süpürme alanı
ρ	: Rüzgar (hava) yoğunluğu

U	: Kinetik enerji
P_{ω}	: Rüzgar gücü
C_p	: Basınç katsayısı
R	: Rüzgar türbin etki alanının maksimum yarıçapı
λ	: Tepe hız oranı
β	: Pitch açısı
P_m	: Rüzgar türbini nominal gücü
C_{pm}	: Maksimum güç katsayısı
C_{pR}	: Nominal güç katsayısı
u_R	: Nominal rüzgar hızı
u_c	: Kesme açısı
T	: Periyot
D	: Darbe periyot oranı
$r(t)$: Referans giriş işareti
$u(t)$: Denetleyici çıkışı
$c(t)$: Sistem çıkışı
$e(t)$: Hata işareti
e	: Hata
de	: Hatadaki değişim

KISALTMALAR DİZİNİ

DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
PI	: Oran – İntegral (Proportional – İntegral)
p. u.	: Birim Değer
GRP	: Plastikle Güçlendirilmiş Cam (Glass Reinforced Plastic)
CFRP	: Plastikle Güçlendirilmiş Karbon Fiber (Carbon Fiber Reinforced Plastic)
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
SDGM	: Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
BM	: Bulanık Mantık
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
MBMD	: Modifiye edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici
DVR/AGF	: Dinamik Voltaj Regülatörü/Anahtarlama Güç Filtresi

1. GENEL BİLGİLER

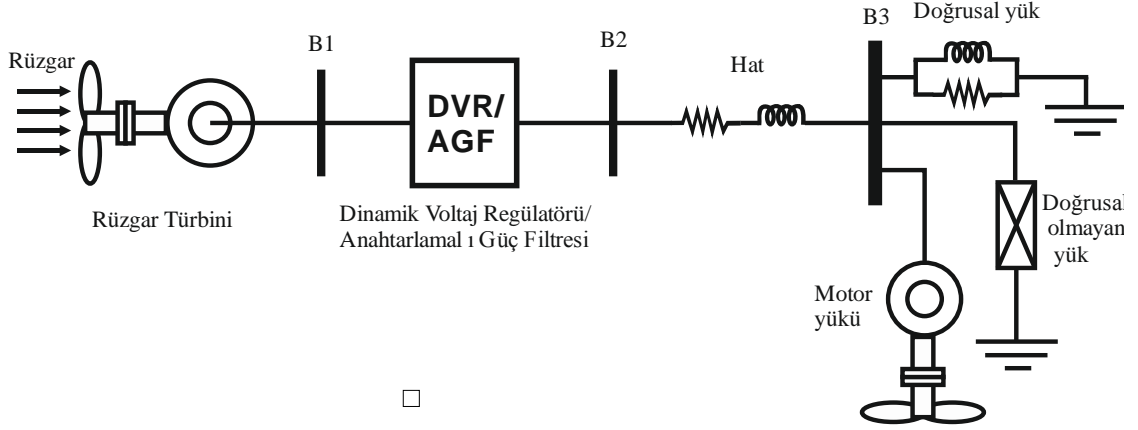
1.1. Giriş

20. yüzyılın başlarında sanayinin hızla gelişmeye başlaması, insanoğlunun hammadde kaynaklarına daha rahat ulaşır olması ve sanayi devrimi ile birlikte tekniğin gelişmesi ile pek çok farklı ürün günlük yaşantımıza girmeye başladı. Üretimin artması ve paralel olarak insan nüfusundaki artma daha fazla kaynağın tüketilmesine neden oldu. Üretimdeki artış enerji sarfiyatını hızlı bir şekilde arttırdı ve sonucunda enerji üretimi konusu daha fazla irdelenmeye başlandı. Artık klasik enerji kaynakları olan petrol, kömür ve hidroelektrikten üretilen elektrik enerjisi yetmez olunca insanoğlu ilk önce nükleer enerjiyi denedi. Nükleer enerjinin diğer enerji çeşitlerine göre çevre ile ilgili endişelere yol açması bu kaynağın aşırı derecede sorgulanmasına ve alternatif kaynakların aranmasına yol açtı.

Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve dalgaların gel git enerjisi gibi doğal ve çevreyi kirletmeyen enerji çeşitleri incelenmeye ve kullanılmaya başlandı. Bu kaynakların hiç tükenmeyeceği düşünüldüğü için bu kaynaklara yenilenebilir enerji kaynakları denmektedir. İnsanoğlu binlerce yıldır zaten kuyudan su çekmek ya da un öğütmek için rüzgar enerjisini kullanıyordu. Benzer şekilde güneş enerjisi kurutma amaçlı olarak hep kullanılmıştı. Bu kaynaklar tekrar popüler hale geldi. Bu sefer amaç bu kaynaklardan direkt olarak elektrik üretmektir. Bunun için güneş panel teknolojisi ve rüzgar türbinleri gibi üreteçler geliştirildi. Şimdi ise bu kaynakların daha verimli çalışması ve daha da yaygınlaştırılmasına çalışılmaktadır.

Rüzgar enerjisi en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. Rüzgardan elde edilen hareket enerjisi ile elektrik üretilmektedir. Üretilen enerjinin tüketicilerde kullanılabilmesi için genlik ve frekans ayarının yapılması gerekmektedir. Rüzgar hızında meydana gelen beklenmedik değişimler üretilen elektrik gücünü, frekansını ve gerilimini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca yükün sabit olmaması, tüketici yüklerinin belirsiz zamanlarda devreye alınıp çıkarılması da üretilen ve tüketilen güçler arasındaki dengeyi bozarak istenmeyen gerilim, frekans ve güç değişimlerinin oluşmasına yol açmaktadır.

Bu tezde, Şekil 1.1’de tek hat şeması verilen bir fazlı güç sistemi oluşturularak, rüzgâr hızı ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmaları durumunda oluşan problemler giderilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın özünü Şekil 1 de gösterilen Dinamik Voltaj Regülâtörü/ Anahtarlama lı Güç Filtresi (DVR/AGF) bloğu ve bu filtre bloğu için geliştirilen kontrolörler oluşturmaktadır.



Şekil 1.1. Sistemin tek hat şeması

Rüzgâr türbininden elde edilen mekanik güç bir asenkron makinanın miline iletilmektedir. Kullanılan üç fazlı sincap kafesli asenkron generatör tek faza indirgenmekte daha sonra gerekli anahtarlama yapılarak hem genlik-frekans kontrolü hem de reaktif güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. Üretilen enerji ile değişik tüketiciler beslenerek önerilen filtre ve denetleyicilerin testi yapılmaktadır.

1.2. Literatür Araştırması

Üç fazlı sincap kafesli kendinden uyarımlı asenkron generatör kullanarak tek fazlı değişik yüklerin beslenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [1-12]. Üç fazlı asenkron generatörün fazları arasına yıldız bağlı üç adet kondansatör yerleştirilip tek fazlı yük beslenmesi sağlanmaktadır [1-8]. Burada amaç sistemde gerilim düzenlemesi sağlamaktır [1]. Sincap kafesli asenkron generatör fazlarına seri ve paralel bağlı 3 adet kondansatör yerleştirilerek fazlardan birisi ile tek fazlı yük beslenmektedir [2-4]. Sistemde kullanılan kondansatör değerlerinin hesaplanması için farklı metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan birisi olan özdeğer metodu yardımı ile bu kondansatör değerleri

hesaplanmaktadır [5]. Deneysel olarak da sincap kafesli asenkron generatör boşa çalıştırılarak kondansatör değerleri belirlenmektedir [6]. Kullanılan seri ve paralel kondansatör değerlerinin minimum ve maksimum olabileceği aralıklar hesaplanmaktadır [7]. Kullanılan kondansatör değerlerinin hesaplanması için Rosenbrock metodu olarak bilinen başka bir metot da kullanılmaktadır. Tek fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün maksimum çıkış gücü için gerekli olan kapasite değerlerinin hesaplanması ile ilgili olarak geliştirilen bir algoritma ile maksimum çıkış gücü için hesaplanan kondansatör değerleri deneysel ve benzetim çalışmalarında uygulanarak istenilen gerilim regülasyonu sağlanabilir [8]. Bunlardan farklı olarak kullanılan asenkron generatörün fazlarından a – b arasına C, b – c arasına 2C kondansatör bağlanarak C-2C şeklinde bir konfigürasyon yapılmakta ve a – c fazları arası boş kalmaktadır, Tek fazlı yük ise a – b fazları arasına yerleştirilerek üç fazlı asenkron generatör tek fazlı olarak çalıştırılır. Bir fazlı asenkron makinanın enerji dönüşümü yapabilmesi için oluşan döner alanın kaydırılması, yani yardımcı sargı veya ek mekanizmaların kullanılması gerekir. Dolayısıyla generatör çalışmanın sağlanması üç fazlı asenkron makinaya göre daha zordur. Bu nedenle rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için üç fazlı asenkron makinelerin kullanılması tercih edilmektedir. Bu çalışmada da üç fazlı makinanın dengeli çalışmasını sağlamak için uçları arasına kapasitörler bağlanmış ve üç fazlı makinada üretilen elektrik gücü tüm fazlara dengeli yayılacak şekilde tek faz üzerinden kullanılmaktadır. Üç faz kendinden uyarımlı asenkron generatörün geçici rejim analizinin incelenmesi için d – q eksen takımında gerçekleştirilen modeli kullanılmaktadır. Asenkron makinanın d-q eksen takımındaki modelinin kullanımı oldukça yaygın olup, deneysel çalışma ile benzetim çalışması sonuçları birbirlerine oldukça yakın elde edilebilmektedir [9]. Farklı bir bağlantı ise generatör fazları arasına bir seri bir de paralel kondansatörler bağlanarak yine tek fazlı yüklerin beslenmesi şeklindedir [10-12]. Bu sistemlerin hem deneysel hem de benzetim çalışmaları yapılarak gerilim regülasyonu sağlanmaya çalışılmıştır.

Tek fazlı alternatif akım kaynağı kullanılarak doğrusal olmayan yüklerin beslenmesi sırasında yükte oluşan istenmeyen harmoniklerin yok edilmesi için düşük maliyetli açık-kapalı modüleli bir güç filtresi Sharaf ve Chalet tarafından önerilmektedir. Burada geliştirilen kontrol stratejisi laboratuvar ortamında test edilmekte ve yük üzerindeki harmonikler oldukça azaltılmaktadır [13].

Rüzgar türbininden üç fazlı değişik yükler beslenen diğer bir sistemde, rüzgar hızındaki ve yüklerdeki değişimler yük üzerindeki güç kalitesinin bozulmasına neden

olmaktadır. Bu güç kalitesinin düzeltilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bu tezde önerilen çalışmaya benzer bir çalışma [14] de yapılmış ve bir dinamik voltaj regülatörü üç çevrimli dinamik hata toplamı tarafından sürülen klasik PI denetleyici ile önerilmiştir.

Modüle edilmiş güç filtreleri kullanarak rüzgar türbinlerinde reaktif güç kontrolü yapıldığı bir çalışma da [15] de verilmektedir. Bu çalışmada darbe genişlik modülasyonu (DGM) tekniği kullanılarak, üç çevrimli hata toplayıcı ile oluşturulan hata sinyali Oransal – İntegral (Proportional – Integral (PI)) türü denetleyici ile sistemin ihtiyaç duyduğu anahtarlama sinyalleri üretilerek sistem anahtarlanmaktadır. Yük üzerindeki gerilimin p.u. (birim değer (per-unit)) olarak referans değer olan 1'e tam olarak oturmadığı görülmüştür. Yapılan kompanzasyon oldukça iyi olmasına karşın reaktif güç tam olarak sıfırlanamamaktadır [15].

Şebekeden bağımsız çalışan bir rüzgar türbin enerji üretim sisteminde düşük maliyetli, DGM anahtarlama, modüleri güç filtre kompanzatorü kullanılarak gerçekleştirilen hem gerilim genliği hem de reaktif güç kontrolü bir çalışma ise [16] da verilmektedir. PI türü denetleyici kullanılan sistemde ihtiyaç duyulan hata sinyali üç çevrimli dinamik hata toplayıcı tarafından oluşturulmaktadır. Gerilim genliği p.u. olarak 1 değerine oturan benzetimde reaktif gücün sıfırlanamadığı ve dalgalı bir grafik izlediği görülmektedir [16].

Yapılan araştırmalarda rüzgar türbinlerindeki ve rüzgar çiftliklerindeki gelişmelerden bahsedilmektedir. Önce rüzgar türbinlerinin ne olduğu, yapıları, nasıl kontrol edildikleri, türbin yapılarındaki gelişmeler ve türbin çeşitleri anlatılmaktadır. Daha sonra kontrol teknikleri üzerine daha fazla ayrıntı verilmektedir [17].

Rüzgar türbini ve dalga türbini kullanılarak elde edilen karma enerji üretim sistemi ile küçük bir kasabanın enerji ihtiyacının karşılanmasını amaçlayan bir benzetim çalışması [18] de yapılmıştır. Burada rüzgar ve dalga hızlarındaki değişimler, üretilen gücün kalitesini ve miktarını değiştirmektedir. Güç kalitesi için bir dinamik voltaj düzenleyicisi tasarlanmıştır. Bu düzenleyici ile yük üzerindeki gerilimin genliği istenilen düzeyde sabit tutulabilmektedir. Reaktif güç ise sıfıra çok yakındır [18].

Çift beslemeli bir rüzgar türbininde reaktif güç kontrolü için bir kontrol yapısı ve tasarımının sunulduğu bir çalışmada [19] deneysel sonuçlara göre reaktif güç akışının dinamik regülasyonu ve onun aktif güç ile bağlantısı gözlemlenmiştir. Ayrıca üretilen güçte de artış sağlanmıştır.

Kaynak [20] de tek fazlı sincap kafesli kendinden uyarımlı asenkron generatörün geçici durum performansının incelenmesinde değişken endüktif yüklerde çıkış geriliminin regülasyonu için tristör kontrollü reaktörden oluşan statik VAR kompanzatörü kullanılmıştır. Değişken endüktif yüklerle karşı sistem çıkış geriliminin sabit kalması tam olarak sağlanamamakla birlikte iyileştirme yapılmıştır. Deneysel çalışmanın benzetim çalışmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [20].

Bu tez çalışmasında kurulan sistemin, diğerlerinden farklı olarak rüzgar türbini ile beslenen üç fazlı bir asenkron generatör ile tek fazlı doğrusal olmayan yüklerin beslenmesini sağlarken gerilim ve frekans kontrolü ile birlikte reaktif güç kontrolü de yapması amaçlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için de, burada yeni bir Dinamik Voltaj Regülatörü ve Anahtarlama Güç Filtresi tasarlanarak rüzgar enerji sistemine bütünleştirilmiş, bu filtrenin kontrol edilebilmesi için de bulanık tabanlı bir denetleyici geliştirilerek önerilmiş ve performansı PI denetleyicinininki ile karşılaştırılmıştır.

1.3. Rüzgar Türbini

Rüzgar enerjisi dünya çapında artan bir şekilde önem kazanmaktadır. Rüzgar enerjisi teknolojisinin ve pazarının bu hızlı gelişimi ile birlikte pek çok şirket ve kuruluş bu konu için büyük bütçeler ayırmış ve bünyelerinde pek çok araştırmacıya yer vererek bu teknolojinin gelişmesi için çaba göstermişlerdir. Özellikle uygun, modern ve maliyeti düşük rüzgar enerjisi projeleri geliştirebilmek bu konuda çalışanların hedefi olmuştur. Başta sanayileşmiş ülkeler bu teknolojiyi daha fazla sahiplenerek kullanmaya başlamışlardır.

Halen beş ülke – Almanya, ABD, Danimarka, Hindistan ve İspanya –dünya genelindeki rüzgar enerjisinin % 83'ünden fazlasını ülkelerinde barındırmaktalar ve bundan yararlanmaktalar [21]. Bu ülkeler, rüzgar enerjisi üretiminin ve güç sistemine bütünleştirilmesiyle ilgili uzmanlığın çoğuna sahipler. Yine de bu yenilenebilir güç kaynağının kullanımı, dünyanın diğer bölgelerine de hızlı bir şekilde yayılmaktadır. Bu durum, mevcut rüzgar enerjisi piyasalarındaki teorik bilginin ve uygulama tecrübelerinin yeni pazarlardaki aktörlere aktarılmasını gerektirmektedir.

Rüzgar türbinleri, rüzgar vasıtasıyla elde edilen hareket ile dönen pervanenin bağlı bulunduğu mili çevirmesi ile elektrik enerjisini elde eden sistemlerdir.

1.3.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

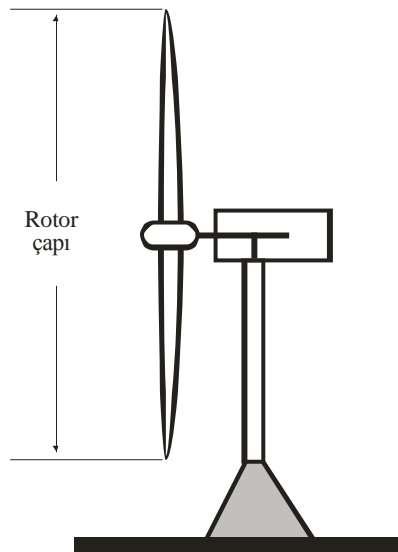
Rüzgar türbinleri; yapılarına göre, güçlerine göre ve şebeke açısından olmak üzere 3 ana kategori altında sınıflandırılabilir.

1.3.1.1. Yapılarına Göre Rüzgar Türbinleri

1.3.1.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip türbinlerde rotor yer konumuna göre yatay eksende çalışır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin maksimum enerji tutabilmeleri için rotorları sürekli rüzgar akış yönünde olmalıdır. Bu da rotorun kule üzerinde dönmesiyle sağlanır. Bu dönme hareketi iki şekilde olabilir. Türbinler rüzgarın yönüne göre önden rüzgarlı ve arkadan rüzgarlı olarak da iki gruba ayrılabilir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğu rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar.

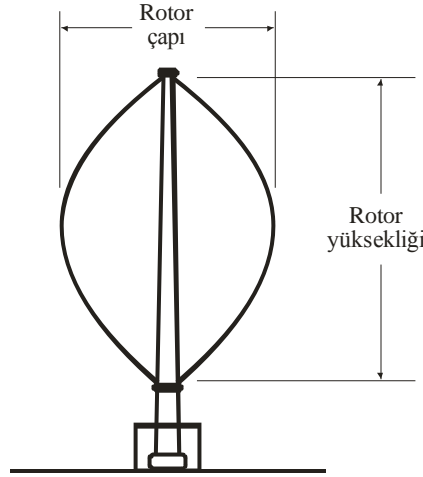
Ticari olarak en yaygın kullanılan türbinler yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Modern rüzgar türbinleri 2 veya 3 kanatlı ve kanat çapları yaklaşık 30 m civarındadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rotor, dişli çark, generatör ve fren bir kulenin üzerinde yatay şafta bağlanmıştır. Ticari amaçla kullanılan türbinlerin hemen hepsi bu gruba girmektedir. Şekil 1.2'de yatay eksenli sistem görülmektedir [22].



Şekil 1.2. Yatay eksenli sistem

1.3.1.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne dik ve kanatları düşeydir. Bunların başlıca tipleri Darrieus ve Savonius tipinde olanlardır. Bu türbinler verim düşüklüğü ve enerji üretiminin azlığı nedeniyle fazla uygulama alanı bulamamışlardır ve ticari olarak pek kullanılmazlar. Şekil 1.3'de düşey eksenli sistem görülmektedir.



Şekil 1.3. Düşey eksenli sistem

1.3.1.2. Güçlerine Göre Rüzgar Türbinleri

1.3.1.2.1. Mikro Türbinler

Genellikle sabit mıknatıslı generatörlerle birlikte batarya şarj etmek üzere kullanılmakta ve güçleri 50 W ile 2 kW arasında değişen türbinlerdir. Bu türbinler uzak iletişim sistemlerinde, ev içi sistemlerde ve gezi teknelerinde kullanılabilir. Şebekeden bağımsız olarak akü şarj prensibiyle çalışır. Rotor çapları 3 m den küçüktür.

1.3.1.2.2. Küçük Güçlü Rüzgar Türbinleri

Güçleri 2 kW ile 40 kW ve rotor çapları 3 m ile 12 m arasında değişen rüzgar türbinleridir. Küçük rüzgar türbinleri genellikle şebekenin olmadığı veya ulaştırmanın

ekonomik olmadığı ya da sorunlu olduğu yerlerde kullanılır. Genellikle akü şarj prensibine göre çalışır.

1.3.1.2.3. Orta Güçlü Rüzgar Türbinleri

Güçleri 40 kW ile 999 kW ve rotor çapları 12 m ile 45 m arasında değişen rüzgar türbinleridir.

1.3.1.2.4. Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri

Rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi gücünü 1 MW' tan büyük, rotor çapının ise 46 metreden büyük olduğu türbinlerdir. Büyük güçlü türbinler, rüzgar çiftliği olarak adlandırılan diziler halinde kurulurlar. Bir rüzgar çiftliğinin toplam gücü genelde 1–150 MW arasındadır.

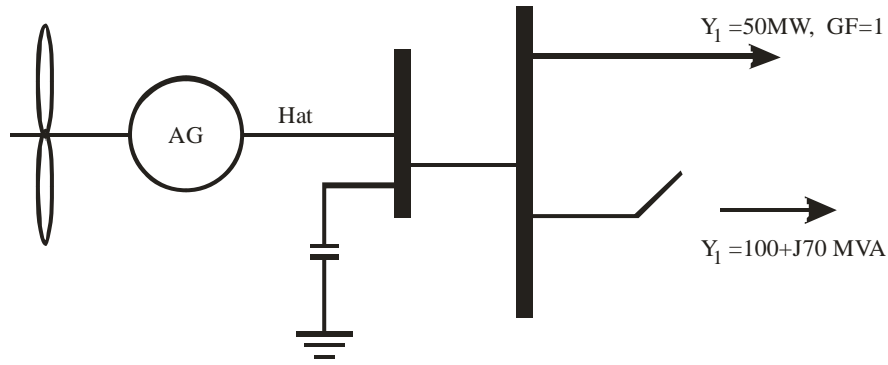
Yatırım amaçlı kurulan büyük güçlü türbinlerden üretilen enerji, mevcut şebekeye verilir. Bu yüzden yatırımdan önce yapılması gerekli olan bazı çalışmalar vardır. Öncelikle bölgenin rüzgar açısından durumunun belirlenmesi gerekir. Yapılan detaylı ve en az bir yıl sürecek teknik rüzgar ölçümleriyle, rüzgar hızı ortalamaları, günlük, mevsimlik ve yıllık dağılımlar ile yaklaşık rüzgar enerjisi değerleri belirlenir. Bunun ardından yapılacak olan fizibilite çalışmaları sonucunda, kurulacak olan santralin büyüklüğü, türbinlerin yerleri ve güçleri, üretilecek enerjinin maliyeti gibi sonuçlara ulaşılır. Bu çalışmalarda, bölgesel elektrik kurumlarıyla ve devletle yapılacak olan anlaşmalar, alınacak özel izinler, çevre halkının yaklaşımı, bölgeye verilen elektriğin maliyeti, yıllık harcama miktarı, arazinin fiziksel yapısı, finansman ve kredi politikası gibi parametreler önemli rol oynar.

Büyük güçlü türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin yatırım maliyeti kabaca bir yaklaşımla 1000 \$/kW' tır. Yıllık bakım masrafı ise yatırımın % 1–1,5 oranında gerçekleşir. Bu şartlar altında kurulacak türbinler ile elde edilen elektrik enerji, maliyeti düşük, çevreyi kirliletmeyen, güvenli ve yenilenebilir bir kaynaktan üretilmiş bir enerji olarak şebekeye aktarılabilir.

1.3.1.3. Şebeke Açısından Rüzgar Türbinleri

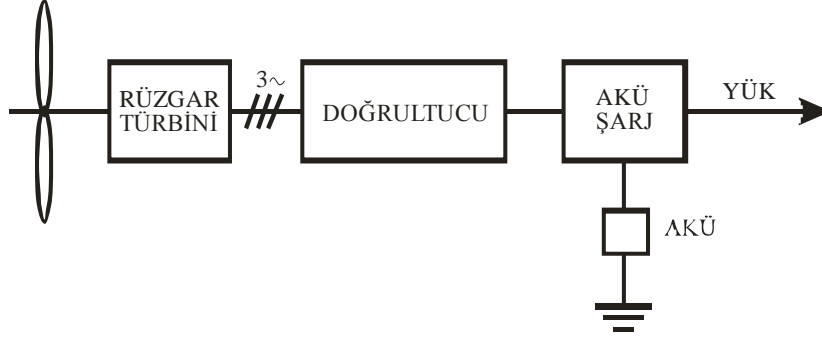
1.3.1.3.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler

Merkezi tüketim merkezlerinden uzaktaki yerleşim merkezlerinin elektrik enerjisi ihtiyacının, merkezi şebekeden karşılanması pahalı bir tesis masrafı gerektirmektedir. Özellikle adalarda su altından yüksek gerilim kabloları ile enerji nakli söz konusu olduğunda bu durum daha da belirginleşmektedir. Rüzgar hızı ve sürekliliği yeterli olan bu tür yerleşim birimlerinin enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilen rüzgar santralleri genellikle şebeke ile herhangi bir bağlantı içerisinde değildir. Şekil 1.4'de şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgar türbininin prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Şebekeden bağımsız çalışan büyük güçlü rüzgar türbini

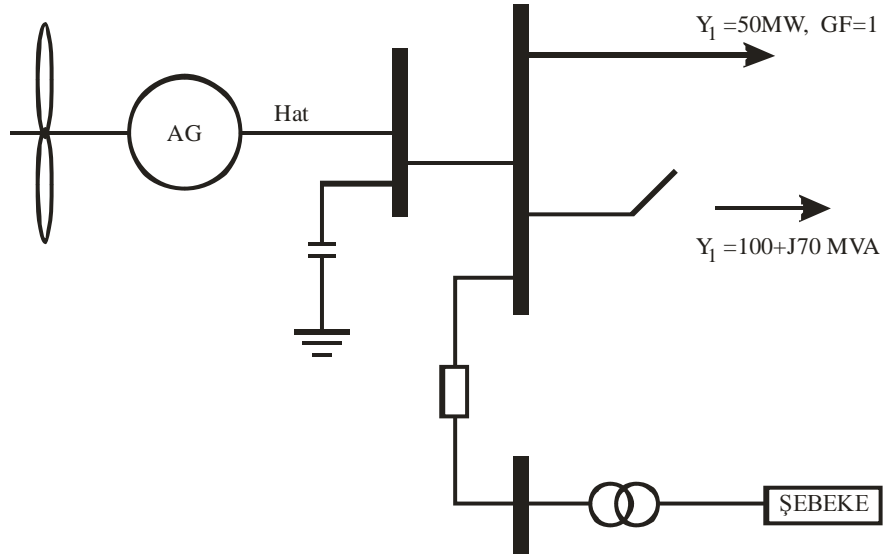
Büyük güçlü şebekeden bağımsız çalışan büyük rüzgar türbinlerinden başka küçük rüzgar türbinleri de mevcuttur. Şebekeden bağımsız olarak çalışan küçük rüzgar türbinleri akü şarj etme prensibine göre çalışır. Akü şarj eden sistemler, genellikle şebekeden uzak bölgelerde kullanılmaktadır. Şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, meteoroloji istasyonları, bilimsel ve diğer araştırma istasyonları gibi yerlerde elektrik ihtiyacını karşılar. Şekil 1.5'de akü şarj prensibine göre şebekeden bağımsız çalışan rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Şebekeden bağımsız akü şarj prensibine göre çalışan rüzgar türbini

1.3.1.3.2. Şebekeye Bağımlı Sistemler

Rüzgar türbini şebekeye paralel olarak bağlanır. Bu sistemde öncelikle rüzgardan üretilen elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Rüzgar koşullarının az olması durumunda ise, rüzgar türbininden sağlanan elektrik dışında kalan ihtiyaç şebekeden sağlanmaktadır. Şebekeye paralel bağlı rüzgar türbinleri büyük güçlü rüzgar türbinleridir. Şekil 1.6'da şebekeye paralel bağlı rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Şebekeye paralel bağlı rüzgar türbini

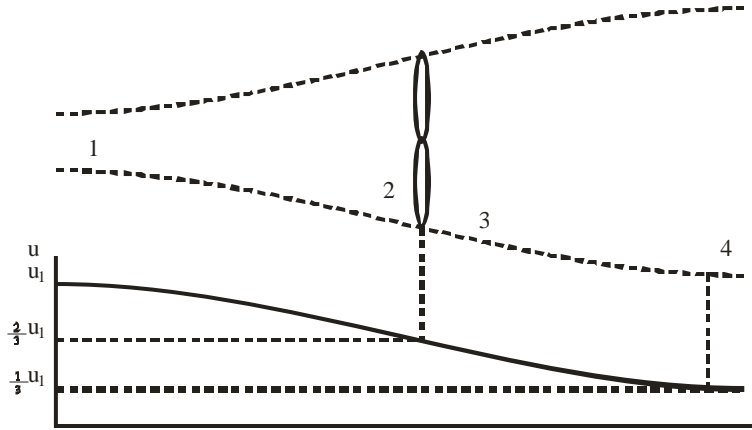
1.3.2. Rüzgar Gücü

Kütlesi m , kontrol hacmi Ax , ve akış hızı u olan bir rüzgar kütesinin kinetik enerjisi (1.1) denklemi ile verilmektedir [23]. Burada A rotor süpürme alanı, rüzgar (hava) yoğunluğudur.

$$U = \frac{1}{2}mu^2 \Rightarrow U = \frac{1}{2}(\rho Ax)u^2 \quad (1.1)$$

Rüzgar gücü, rüzgar kontrol hacminin kinetik enerjisinin zamana göre türevi olup eşitlik (1.2) ile verilmiştir. Bu eşitlik, elde edilen kullanılabilir toplam gücü temsil eder.

$$P_\omega = \frac{dU}{dt} \Rightarrow P_\omega = \frac{1}{2}\rho Au^2 \frac{dx}{dt} \Rightarrow P_\omega = \frac{1}{2}\rho Au^3 \quad (1.2)$$



Şekil 1.7. Rüzgar akışı ve spesifik hız değerleri

En iyi koşullar altında bir rüzgar türbinine rüzgar akış hız dağılımı Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Burada u_1 , giriş hızını, u_2 ve u_3 pervane önünde ve arkasındaki hızları, u_4 ise çıkış hızını temsil etmektedir. Bu hızlar arasındaki denklemler aşağıdaki eşitliklerdeki gibi verilmektedir.

$$u_2 = u_3 = \frac{2}{3}u_1 \quad (1.3)$$

$$u_4 = \frac{1}{3}u_1 \quad (1.4)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad (1.5)$$

$$A_4 = 3A_1 \quad (1.6)$$

A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 sırasıyla 1, 2, 3, ve 4 noktalarındaki kesit alanlarıdır. Rüzgar, türbin üzerinden geçerken türbinin kullandığı güce eşit bir güç kaybedecektir. Bu eşitlik (1.7) ile verilmiştir.

$$P_{m,ideal} = P_1 - P_4 \Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho(A_1u_1^3 - A_4u_4^3) \quad (1.7)$$

Bu eşitlikte;

$u_4 = \frac{1}{3}u_1$ ve $A_4 = 3A_1$ eşitlikleri yerine konursa,

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho \left[A_1u_1^3 - (3A_1)\left(\frac{1}{3}u_1\right)^3 \right] = \frac{1}{2}\rho A_1u_1^3 \left(1 - \frac{3}{27}\right) \quad (1.8)$$

$$\Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho A_1u_1^3 \frac{8}{9} \quad (1.9)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte A_1 , 1 nolu tüp kesit alanıdır. İdeal bir türbini, rüzgardaki toplam gücün $8/9$ 'ini kullanabilecektir. Rüzgar türbininin karşıt çapraz alanının aksine elde edilen güç genellikle rüzgar türbin etki alanı, A olarak belirtilir. Fakat rüzgar türbin etki alanı ifadesi olan A terimi, A_2 terimi ile açıklanır. Bu durumda eşitlik (1.3-1.4-1.5-

1.6) kullanılarak eşitlik (1.10) elde edilebilir ve bu türbinin çapraz bölgesel alana eşit olan rüzgar türbinin etki alanlarıyla havanın dağıtılmamış türbindeki toplam gücün %59'undan fazlasını kullanamayacağını gösterir. Bu Bertz teoremi olarak bilinir ve bütün türbinlerin %59'dan fazla verimli olmasını sınırlar.

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left[\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) u_1^3 \right] \Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_2 u_1^3 \right) \quad (1.10)$$

$$P_{m,ideal} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A_2 u_1^3 \right) = 0.59 P_\omega \quad (1.11)$$

1.3.3. Türbin Gücü

Türbinin gücü, P_w rüzgarın gücü ile C_p performans katsayısının çarpımı şeklinde tanımlanır.

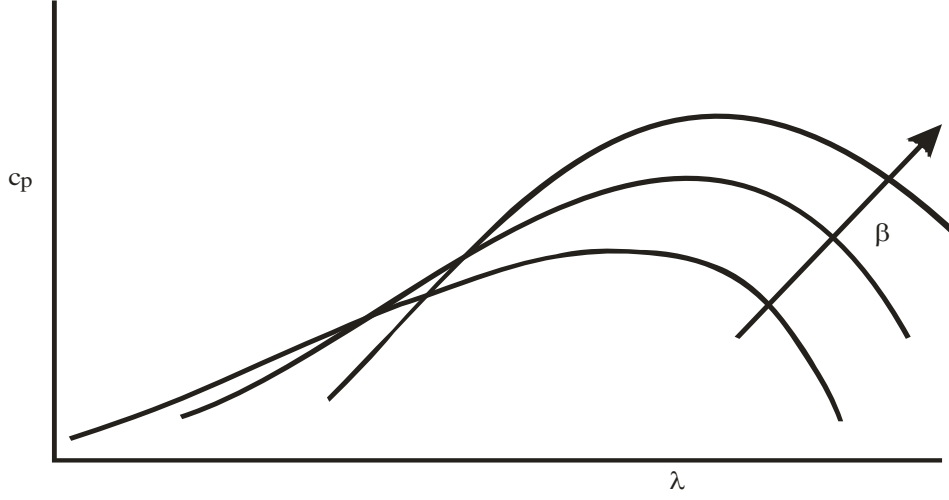
$$P_m = C_p P_\omega = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \quad (1.12)$$

C_p performans katsayısı değeri rüzgar hızı, türbinin dönme hızı, rotor kanat açısı ve türbin pervane parametreleri ile değişir. Bu eşitlik (1.12)'de görüldüğü gibi 0,59'u aşamaz. Tepe hız oranı, türbin pervanesinin uç hızının rüzgar hızına oranıdır. Burada ωR ve u pervane uç hızı ve rüzgarın hızıdır. R parametresi rüzgar türbin etki alanının maksimum yarıçapıdır.

$$\lambda = \frac{\omega R}{u} \quad (1.13)$$

1.3.4. Basınç Katsayısı C_p 'nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi

Şekil 1.8'de Basınç katsayısı C_p nin tepe hızı oranı λ ve pitch açısı β ile değişimi görülmektedir.



Şekil 1.8. Basınç katsayısı C_p 'nin tepe hızı oranı λ ve pitch açısı β ile değişimi

Eğer bir rüzgar türbininin rotorunun güç performansı değerlendirilecekse onun $C_p(\lambda, \beta)$ eğrisi rüzgar türbini üreticisinden ve her bir tepe hız oranı ve pitch eğim açısı için katsayı performansını değerlendirmek için oluşturulan teknik tablodan yararlanılmalıdır. Eğer dönme hızı ω ve eğim açısı β biliniyorsa ($\omega = \omega_0$ ve $\beta = \beta_0$, şartlarında dönen rotor için) mekanik güç çıkışı P_m herhangi bir u karşıt rüzgar hızında eşitlik (1.12) kullanılarak bulunabilir. Bazen bütün $C_p(\lambda, \beta)$ bilgisi bulunmaz. Bu durumda güç performansı hesaplamalarında eşitlik (1.12) direk olarak kullanılamaz. Herhangi bir çalışma eğim açısı hızın bir fonksiyonu olarak iyi bir yaklaşımla C_p eşitlik (1.14) ve (1.15) kullanılarak bulunur. F ve G katsayıları $C_p(u_c) = 0$ ve $C_p(u_R) = C_{pR}$ sınır koşulları uygulanılarak bulunabilir.

$$C_p = C_{p_m} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^3 \right] \Rightarrow u_c \leq u \leq u_R \quad (1.14)$$

$$C_p = C_{pR} \left[\frac{u_R^3}{u^3} \right] \Rightarrow u_R \leq u \leq u_F \quad (1.15)$$

F ve G katsayıları eşitlik (1.16) ve (1.17)'de verilen sınır şartları kullanılarak bulunabilir. Bu, performans katsayısının kesme hızındaki ve nominal hızdaki değerinden

elde edilir. Burada performans katsayısı ve nominal hızdaki performans katsayısı için C_p , C_{pR} gösterimleri kullanılmaktadır.

$$C_P(u_c) = 0 = C_{Pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 \right] \quad (1.16)$$

$$C_P(u_R) = C_{pR} = C_{Pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^3 \right] \quad (1.17)$$

Eğer eşitlik (1.14) ve (1.15)'de verilen C_p değeri (1.12) ifadesinde yerine yazılırsa türbinin güç değişimi rüzgar hızının bir değişimi olarak eşitlik (1.28) ve (1.29)'da gösterildiği gibi değerlendirilebilir. Eşitlik (1.18) $u_c \leq u \leq u_R$ aralığı ve eşitlik (1.19) $u_R \leq u \leq u_F$ aralığı için geçerlidir.

$$P_m = P_R \left[\frac{C_{pm}}{C_{pR} u_R^3} \right] \left[1 - (F + G) u^3 + (2F - 3G) u_m u^2 + (3G - F) u_m^2 u - G u_m^3 \right] \quad (1.18)$$

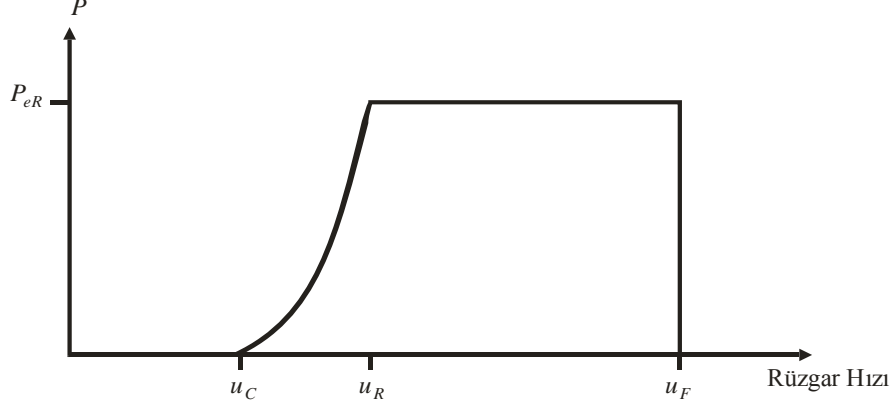
$$P_m = P_R \quad (1.19)$$

Burada P_m rüzgar türbini nominal gücü, C_{pm} maksimum güç katsayısını, C_{pR} nominal güç katsayısını, u_R nominal rüzgar hızını, u_c kesme açısını göstermektedir. Bunlar rüzgar türbinleri için verilirler. Her bir pitch açısı için bu yaklaşım metodu rotor ve milin başlangıç dönme momenti, maksimum performans katsayısı, nominal performans katsayısı, nominal rüzgar hızı, C_{pm} 'de oluşan rüzgar hızı ve rüzgar türbini nominal gücü, kesme açısının bir fonksiyonudur.

1.3.5. Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Güç Yapısı

Rüzgar gücünü değerlendirdikten sonra P_w , C_p değişimleri ve rüzgar türbininin kontrol yapısı düşük hızlarda mümkün olduğu kadar daha fazla güç elde etmek ve sonra

türbini korumak için yüksek hızlarda gücü ayarlamaktır. Şekil 1.9'da genel rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak arzu edilen güç yapısını göstermektedir.



Şekil 1.9. Rüzgar türbininin arzu edilen güç yapısı

Bir rüzgar türbininin elektriksel çıkış gücü için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$P = 0 \quad (u \leq u_c) \quad (1.20)$$

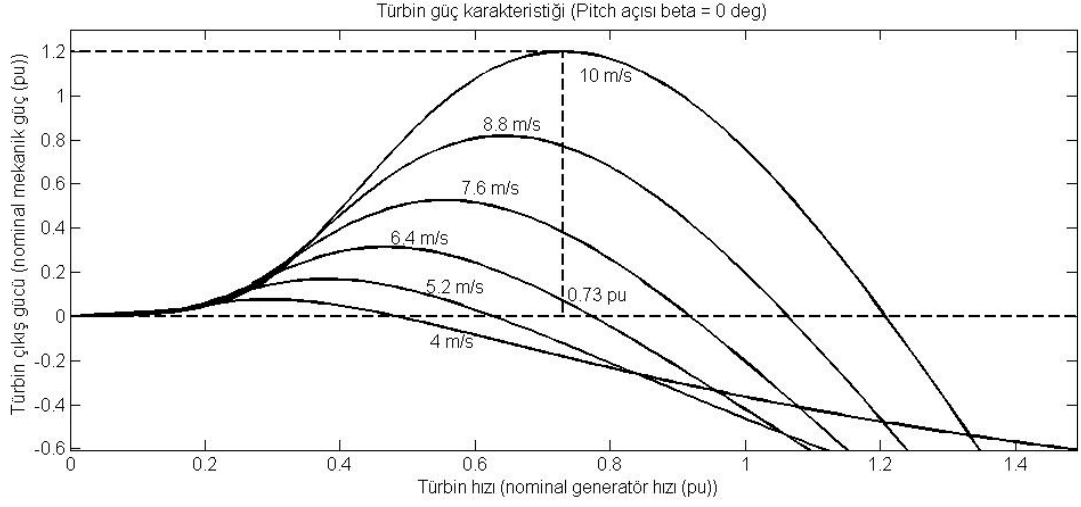
$$P = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A u^3 \quad (u_c \leq u \leq u_R) \quad (1.21)$$

$$P = P_R \quad (u_R \leq u \leq u_F) \quad (1.22)$$

$$P = 0 \quad (u > u_F) \quad (1.23)$$

u_c parametresi elektriksel güç üretiminin başladığı kesme rüzgar hızıdır, u_R nispi rüzgar hızıdır. Bu u_R değeri maksimum elektrik gücünü üreten minimum hızdır. u_F , türbinin yüksek hızlı rüzgarlardan korunmak için kapatıldığı hızdır. Fakat güç şebekesinde bağlanan bir rüzgar türbini için yük talebini karşılayabilen bir kontrol yapısı kullanılmalıdır.

Sistemde kullanılan rüzgar türbini nominal hızı 10 m/s ve 10 kVA güç değerinde olan bir türbindir. Şekil 1.10'da türbin karakteristiği görülmektedir.



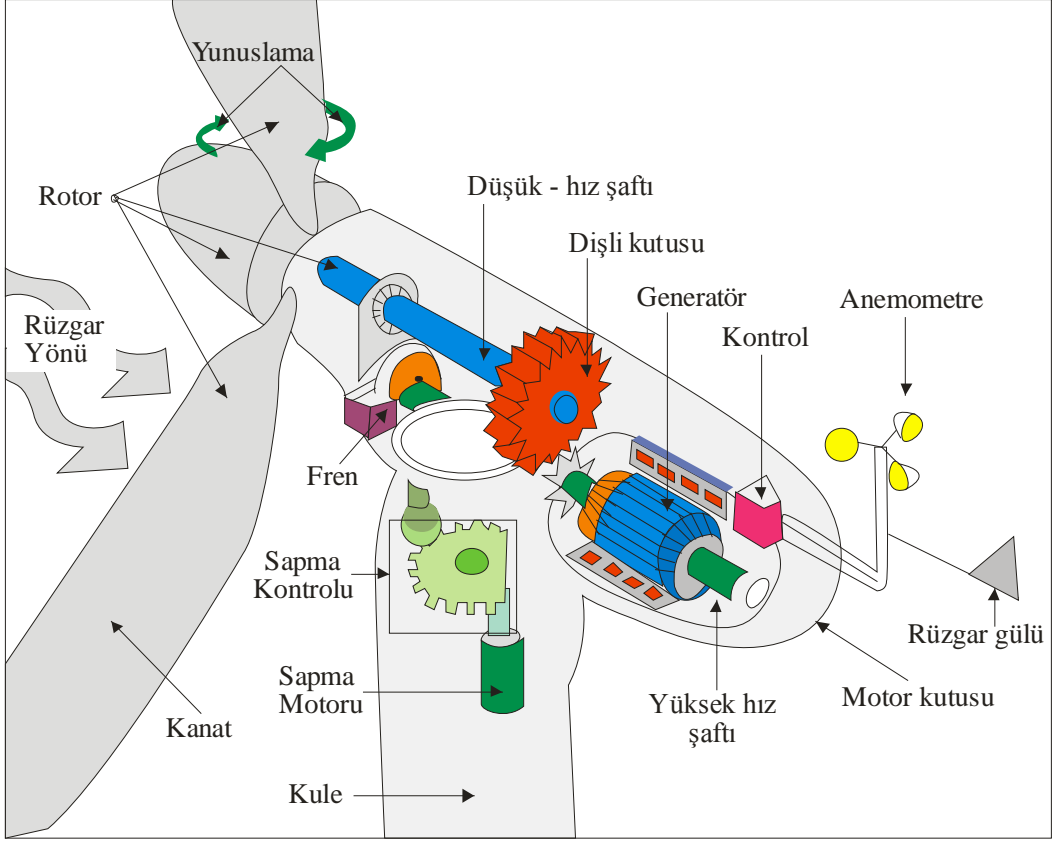
Şekil 1.10. Rüzgar türbin karakteristiği

1.3.6. Rüzgar Türbininin Kısımları

Bir rüzgar türbini, coğrafi şartlara göre rüzgar hızının etkilenmeyeceği yükseklikteki bir kule üzerine yerleştirilmiş gövde ve rotordan oluşur. Kanatlar ve göbek, rotor olarak adlandırılır. Rüzgarın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir ve düşük devirli ana milin dönüş hareketi gövde içerisindeki iletim sistemine, oradan generatöre aktarılır. Rotorun dönüş hızı sabit veya değişken olabilmektedir.

Rüzgar türbininin en önemli parçası mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren generatörlerdir. Orta ve büyük güçlü sistemlerde senkron ve asenkron generatörler yaygın olarak kullanılırlar.

Bir rüzgar türbininde bulunan bazı aksamlar Şekil 1.11’de görülmektedir [23].



Şekil 1.11. Bir rüzgar türbininde bulunan bazı aksamalar

1.3.6.1. Kanatlar ve Kuyruk

Kanatlar; genellikle 1, 2, 3, 4 veya daha çok parçadan yapılırlar. Malzeme olarak paslanmaya dayanıklı galvanizli sac, ahşap veya özel karbon ile karıştırılmış kompozit malzemeler kullanılır. Kanatlar plastikte güçlendirilmiş camdan (GRP, Glass Reinforced Plastic), tahtadan, lamine parkeden, plastikte güçlendirilmiş karbon fiberden (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic), çelikten veya alüminyumdan yapılmaktadır. Dünyada yapılan çoğu kanatlarda GRP kullanılmaktadır.

Kanatlar yapılırken, reçine içine yatırılıp mukavemeti artırılmakta ve pürüzlerin oluşmaması için vakum içinde tutulmaktadır. Küçük türbinlerin ağırlık problemini gidermek için hafif malzemeler kullanılırken, büyük türbinler için ağırlıktan çok aerodinamiklik önem taşımaktadır. İyi bir kanat için bazı kriterler vardır. Bunlar; yüksek kaldırma ve sürüklenme kuvveti, çok yüksek rüzgarlarda ani duruş veya yavaşlama karakteristiği, pürüzsüzlük, düşük gürültü karakteristiği olarak belirlenmiştir. Yakın

geçmişe kadar mühendisler kanat olarak helikopter ve gemi pervaneleri kullandı. Fakat bunlar rüzgar türbinleri için ideal değildir. Rüzgar için kaldırma gücünü maksimum yapan ve bunun yanında ani duruşları önleyecek ve böylece sürüklenme gücünü azaltacak türbinler uygundur. Fakat bazen de yüksek hızlarda tahribatı önlemek için yavaşlatma gerekmektedir. Bunun için kanatın açısı ile oynanmakta ve kararsız kaldırma gücünün etkisi en aza indirilmektedir.

Küçük rüzgar türbinlerinde kuyruk, türbinin rüzgarı karşısına alıp konumlandırmak için kullanılır. Yamuk veya kare şeklinde bir levha olabilir.

1.3.6.2. Kule

Yaygın olarak kullanılan kule çeşitleri, kafes ya da tüp şeklinde ve çelik ya da beton malzemedir yapılır. Genelde, küçük ve ucuz kulelerin kenarlarından tellerle yere bağlantısı yapılır. Modern büyük kuleler tüp şeklindedir ve kötü hava şartlarında içerisinden makine kabinine ulaşmayı sağlayabilir. Kuleler, rüzgarı iyi alacak şekilde, ama büyük rüzgarlardan da etkilenmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir. Ayrıca rotorda oluşan frekanslardan hiç birinin, kulenin rezonans frekansı olmamasına dikkat edilmelidir. Yoksa sistem çökebilir. Çok kısa kulelerin inşası, istenilen rüzgarın alınamaması ve sonuçta verimin düşük olmasını beraberinde getirir. Rüzgar yükseklerde daha az türbülansa sahip olduğu için büyük kuleler tercih edilir. Ayrıca bina ve ağaçlarında rüzgar akışını kesmesi engellenir. Bu yüzden büyük kanattan önce yüksek kuleler tercih sebebidir.

1.3.6.3. Rotor

Rüzgar türbinlerinin en önemli parçası rotorlarıdır. Rotor, rüzgarın akış hızını mekanik enerjiye çevirip generatörün şaftına aktarmaya yarar. Rüzgar, türbinleri daha çok uçak pervaneleri gibi çevirir. Hava kanatın üstünden daha hızlı akar. Sonuçta basınç farkından dolayı hareket oluşur ve dönen kanatlar kendilerine bağlı olan generatörü çevirmeye başlarlar. İki çeşit rotor vardır. Birincisi, kaldırma kuvvetinin uygulandığı ve ikincisi de sürüklenme kuvvetinin uygulandığı rotorlardır. Düşük hızlı sistemler, sürüklenme kuvveti ile rotoru çevirirler ve genelde rüzgar hızından yavaş hızla dönerler. Bu tür

sistemlerde dönme momenti fazladır. Yüksek hızlarda çalışan sistemlerde hız, rüzgar hızının bir kaç katına çıkabilir. Fakat dönme momenti düşüktür.

1.3.6.4. Vites Kutusu

Rüzgar türbinleri göreceli olarak düşük hızlarda çalışmaktadır. Kanat uç hızları tipik olarak 55–90 m/sn mertebesindedir. 30 metre çapındaki bir türbinin kanatları yaklaşık 35 ila 50 devir/dakika hızla dönmektedir. Generatörün senkron hızında (tipik olarak 1500 devir/dakika) dönen bir shaft çıktısı için hız yükseltici vites kutusu gerekmektedir. En sık kullanılan iki vites kutusu tipi paralel shaft ve büyük bir dişli çarkın içinde dönen küçük dişli vites kutularıdır. Paralel, shaft tasarımları basit olmakla beraber göreceli olarak ağır ve shaft çıkışı ana eksenle çakışmamaktadır. Dişli çark vites kutuları daha hafif, daha düzenli ve çıkış shaftları giriş shaftları ile aynı doğrultu üzerindedir. Daha büyük rüzgar türbinleri (çapı 25 metreden büyük) için dişli çark vites kutularının maliyet ve ağırlık üstünlükleri giderek artmaktadır.

1.3.6.5. Eğim Donanımı

Dikey eksenli türbinlerde makine kabinini, gelen rüzgarın yönüne göre çeviren bir mekanik aksam vardır. Bu aksama “eğim donanımı (rotadan sapma veya yaw hareketi aksamı)” denilir. Rüzgar yönü, bu türbinlerde rotorun taradığı alana dik olmalıdır. Eğim donanımı sürücüsünü bir kapalı-döngü kontrol sistemi kontrol etmektedir. Bir rüzgar türbin kuyruğu, makine kabininin tepesine yerleştirilerek, rüzgar yönüne göre eğim donanımını ayarlaması için kontrol mekanizmasını uyarır. Eğim donanımı yüksek rüzgar hızlarında da gücü azaltmak için makine kabinini çevirir.

1.3.6.6. Fren Sistemi

Rüzgar gücü, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğu için yüksek hızlarda çok büyük kuvvetler elde etmek mümkündür. Bu yüzden bir fren sistemine ihtiyaç duyulacağı açıktır. Fren sistemleri, sistemin yüksek hızlarda veya acil durumlarda güvenli bir hale getirilmesini sağlarlar. Aşırı rüzgar hızlarında devreye giren fren sistemi, öngörülen güçten

daha fazlasının üretilmesini engeller ve dolayısıyla şebekeye verilecek olan harmonik bozulmaların önüne geçmiş olur. Ayrıca aşırı hızdan dolayı meydana gelebilecek kanat, kuyruk veya diğer aparatların kopması engellenmiş olur.

1.3.6.7. Elektriksel Aksamlar

Elektrik enerjisinin üretilmesi sürecinde sistemde generatör, evirici, doğrultucu, akü gibi elektriksel aksamlar olmalıdır. Elektriksel aksamlar sistemin frekans, voltaj ve elde edilen sinyalin harmoniklerinin düzenlenmesi işini kurulmuş durumdadır [24].

1.3.6.7.1. Generatör

Rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi elde etmek için iki türlü generatör kullanılır: Asenkron generatörler ile değişken hızlı generatörler. Fırçalı veya fırçasız, bir ya da 3 fazlı olabilir. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan asenkron motorlar, geleneksel endüstriyel asenkron motorlara benzerdir. Asenkron generatörlerin hızları kutup sayılarına göre değişmektedir. 4 kutup için hız 1500 devir/dakika, 6 kutup için 1000 devir/dakika ve 8 kutup için 750 devir/dakikadır [24].

1.3.6.7.2. Doğrultucu ve Gerilim Düzenleyici

Rüzgar hızı sürekli değişkenlik gösterdiğinden üretilen gerilimin frekansı ve genliği de sürekli değişecektir. Üretilen enerji şebekeye verilmeden önce sinüs halinde ve 50 Hz frekansta olmalıdır. Bunun için önce doğrultulması gereklidir. Daha sonra ise düzenleyici ile gerilim genliklerinde kararlılık sağlanmalıdır. Kullanılan üç fazlı generatörün, alternatif çıkış gerilimi altı diyottan oluşan bir doğrultucuyla doğrultulur. Doğrultucunun çıkış gerilimi elektronik voltaj regülatörüyle düzenlenir. Doğrultucu ve gerilim regülatörü alternatörde dahili olarak bulunmaktadır.

1.3.6.7.3. Akü

Generatörden çıkıp doğrultulan ve düzenlenen gerilim çeşitli gerilim ve akım değerlerindeki aküleri şarj eder. Yani bir nevi enerji depolaması yapılıır.

1.3.6.7.4. Evirici

Alternatif akımla çalışan yüklerin ihtiyacını karşılamak için akü çıkışındaki doğru gerilimin alternatif gerilime çevrilmesi gereklidir. Bunun için uygun güçte evirici kullanılır [25].

1.4. Asenkron Makina

1.4.1. Genel Bilgiler

Asenkron motorlar; stator, rotor, rotor yatakları, pervane ve yan kapaklardan meydana gelmiş enerji dönüşümü yapabilen elektrik makinalarıdır. Asenkron motorlar bir fazlı ve üç fazlı olarak üretilmektedir.

Stator üzerinde üç fazlı alternatif akım sargıları bulunmaktadır. Bu sargılar uygun şekilde düzenlenerek motorun istenilen kutup sayısında üretilmesi sağlanır. Her bir faza ait sargı uçları motor gövdesi üzerindeki bağlantı kutusuna toplam altı uç olarak bağlanır. Daha sonra motorun çalışma durumuna göre bu uçlar yıldız veya üçgen olarak bağlanırlar.

Rotor ise kısa devre çubuklu ve sargılı olmak üzere iki değişik yapıda olabilir. Kısa devre çubukları rotor gövdesine açılmış olukların içerisine eritilmiş alüminyum dökülerek oluşturulur. Bu çubukların uçları rotorun her iki dış kenarlarındaki birer alüminyum halka ile kısa devre edilmiştir. Rotoru sargılı olanlarda ise rotor sargıları statorda olduğu gibi üç fazlı olarak sarılırlar ve sargı uçları fırça ve bilezikler yardımıyla dışarı çıkartılarak motor gövdesi üzerindeki bağlantı kutusuna bağlanır.

Asenkron motorlar üç fazlı şebekeden beslenerek çalıştırılırlar. Yani aynı anda her faz sargısına da gerilim uygulanması gerekmektedir. Asenkron motorlar statorlarından verilen elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek milinden yüke aktarırlar. Rotor ise gerekli enerjiyi dönüşüm yoluyla statordan alır. Dolayısıyla asenkron motorların çalışması

için tek kaynağın olması yeterlidir. Senkron makinalar gibi ikinci bir kaynak olan DA kaynağa gerek yoktur. Bundan dolayı asenkron motorlar tek uyarımlı motorlar sınıfına girerler.

Asenkron motorların stator sargılarına, sargı gerilim değerleri göz önünde bulundurularak (yıldız – üçgen durumu) üç fazlı gerilim uygulandığında, stator sargılarından geçen akımlardan dolayı manyetik stator akı yoğunluğu oluşur. Bu manyetik akı yoğunluğunun çok az bir kısmı kaçak olarak havadan devresini tamamlarken büyük kısmı da stator demir nüvesi üzerinden, stator – rotor arasındaki hava boşluğundan ve rotor demir nüvesi üzerinden devresini tamamlar. Dolayısıyla, hem stator sargılarında hem de rotor sargılarında Faraday yasasına göre gerilim endüklenir. Rotor sargıları kısa devre olduğundan, rotor devresinden kısa devre akımı dolaşır. Rotor akımından dolayı rotor akı yoğunluğu oluşur. Stator sargılarından geçen akımdan dolayı stator döner alanı, rotor sargılarından geçen akımdan dolayı da rotor döner alanı meydana gelir. Stator ve rotor döner alanlarının karşılıklı etkileşimi sonucunda motorda bir dönme momenti oluşur. Stator manyetik akı yoğunluğu stator döner alan yönünde ve hızında, rotor manyetik akı yoğunluğu da rotor döner alan yönünde ve hızındadır.

Statorun toplam kutup sayısı P ve uygulanan gerilimin frekansı da f_s ise statorun devir/dakika (dev/dak) cinsinden senkron hızı (n_s), (1.24) numaralı eşitlikteki gibi ifade edilir.

$$n_s = \frac{120(f_s)}{P} \quad \left(\frac{\text{dev}}{\text{dak}} \right) \quad (1.24)$$

veya aynı ifade açısal hız ω_s cinsinden (1.25) numaralı eşitlikteki gibi yazılabilir.

$$\omega_s = \frac{120(f_s)}{p} \frac{2\pi}{60} \quad \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \quad (1.25)$$

Stator döner alanı n_s senkron hızında dönerken, asenkron motorun rotor hızı n_r daima senkron hızdan küçüktür. Bileşke döner alanın rotora göre hızı ise, senkron hız ile rotor hızı arasındaki fark kadardır. Stator ve rotor hızları arasındaki fark, diğer bir ifadeyle bileşke döner alan hızı genellikle kayma hızı olarak ifade edilir. Buna göre, d/d ve rad/s cinsinden kayma hızı eşitlik (1.26)'daki gibidir.

$$\text{Kayma hızı} = n_s - n_r = \omega_s - \omega_r \quad (1.26)$$

Stator ve rotor arasındaki kayma s ile gösterilip (1.27) numaralı denklemden hesaplanır.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.27)$$

Dolayısıyla, stator ve rotor hızları arasındaki bağıntıdan kayma kullanılarak rotor hızı eşitlik (1.28)'deki gibi hesaplanır.

$$\left. \begin{aligned} n_r &= n_s - s(n_s) = n_s(1-s) \\ \omega_r &= \omega_s - s(\omega_s) = \omega_s(1-s) \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

Buradan, eşitlik (1.26) ve eşitlik (1.28)'deki kayma hızı ve rotor hızları toplamının stator hızına eşit olduğu ortaya çıkar.

$$\left. \begin{aligned} n_s &= (n_s - n_r) + n_s - s(n_s) \\ n_s &= (n_s - n_r) + n_s - \frac{(n_s - n_r)}{n_s}(n_s) \\ n_s &= n_s - n_r - n_s + n_r + n_s = n_s \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

Asenkron motor dururken, stator sargılarına gerilim uygulandığı anda rotor dönmeye başlamadan, stator frekansı f_s ve rotor frekansı f_r birbirlerine eşittirler. Benzer olarak stator sargılarında endüklenen E_s gerilimi ile rotor sargılarında endüklenen E_r gerilimi de, dönüştürme oranı $a = 1$ ise, birbirlerine eşittir. Ayrıca $n_r = 0$ olduğundan, kayma $s = 1$ olur. Rotor senkron hızda dönerse, $n_r = n_s$ olacağından, kayma $s = 0$, $f_r = 0$ Hz ve $E_r = 0$ volt olur. Çünkü, rotor çubukları stator döner alan hızında döndüğünden, stator manyetik akısı tarafından kesilmemektedir. Kaymanın $0 < s < 1$ arasındaki değerlerde ise, statora uygulanan gerilimin frekansı f_s iken rotorda endüklenen gerilimin frekansı da kaymaya bağlı olarak eşitlik (1.30)'deki gibi ifade edilir.

$$f_r = s(f_s) = \frac{n_s - n_r}{n_s} f_s \quad (1.30)$$

Stator döner alan hızı $n_s=120f_s/P$ olarak ifade edildiğine göre, $f_s=Pn_s/120$ olur. Bu ifade eşitlik (1.30)'da yerine yazılırsa eşitlik (1.31) elde edilir.

$$f_r = \frac{n_s - n_r}{n_s} f_s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \left(\frac{Pn_s}{120} \right) = \frac{P}{120} (n_s - n_r) \quad (1.31)$$

Stator ve rotor sargılarında endüklenen gerilimler arasındaki bağıntı da frekans bağıntısı ile aynı olup eşitlik (1.32)'deki gibi ifade edilir.

$$E_r = s(E_s) \quad (1.32)$$

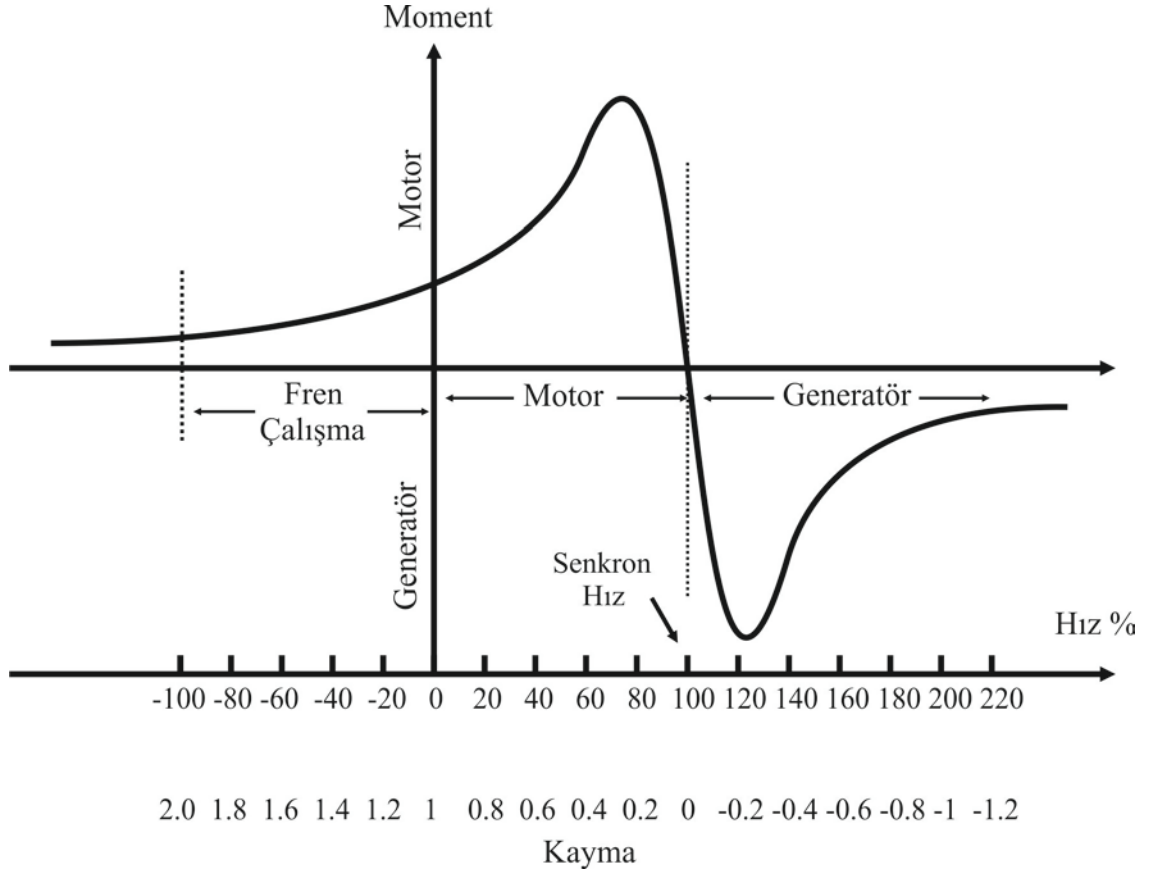
Eşitlik (1.30) ve eşitlik (1.31)'de görüldüğü gibi, rotor dönerken stator ve rotor frekansları ile endüklenen gerilimler arasındaki bağıntı kayma ile orantılıdır. Rotor hızı normal çalışmada senkron hıza çok yakın olduğundan kayma küçük olacaktır. Kaymaya bağlı olarak rotor frekansı ve gerilimi de azalacaktır.

Üç fazlı asenkron motorların stator sargılarına uygun değerde gerilim uygulandığında herhangi bir kontrol ünitesine gerek kalmadan motor çalışır. Uygun gerilim değeri ise motorun bağlantı durumuna göre değişir. Sargı bobinleri 380 volta göre yapılmış bir asenkron motor yıldız – üçgen çalıştırılacaksa, 380 voltluk bir şebeke gerilimi her iki çalışma durumu için de uygundur. Motor çalışırken şebekeden P_g giriş gücünü çeker. Bu giriş gücü, statorda bakır ve demir kayıplarına uğradıktan sonra stator – rotor arasındaki hava boşluğundan rotora aktarılır. Rotor devresinde de bakır kayıpları, demir kayıpları, rüzgar kayıpları, sürtünme kayıpları ve kaçak yük kayıplarına uğrayan güç, mile yük gücü veya mekanik güç olarak aktarılır. Ancak rotor demir kayıpları diğer kayıpların yanında çok küçük olduğundan, rotor devresinde gösterilmez. Motorun toplam demir kayıpları stator tarafında stator demir kaybı olarak gösterilir.

Asenkron motorların giriş güçleri, motorun etiketinde verilen gerilim akım değerleri ile bulunur. Buna göre motorun şebekeden çektiği görünür (S_g), aktif (P_g) ve reaktif (Q_g) bir faz güçleri motorun güç katsayısı da kullanılarak (1.33) numaralı eşitlikteki gibi bulunur.

$$\left. \begin{aligned} S_g &= V_{faz} I_{faz} \quad (\text{VA}) \\ P_g &= S \cos(\varphi) = V_{faz} I_{faz} \cos(\varphi) \quad (\text{W}) \\ Q_g &= S \sin(\varphi) = V_{faz} I_{faz} \sin(\varphi) \quad (\text{VAr}) \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

Asenkron motorun bir faz güçleri bulunduğundan sonra toplam güçlerini bulmak için bir faz güç değerleri üç ile çarpılır [26].



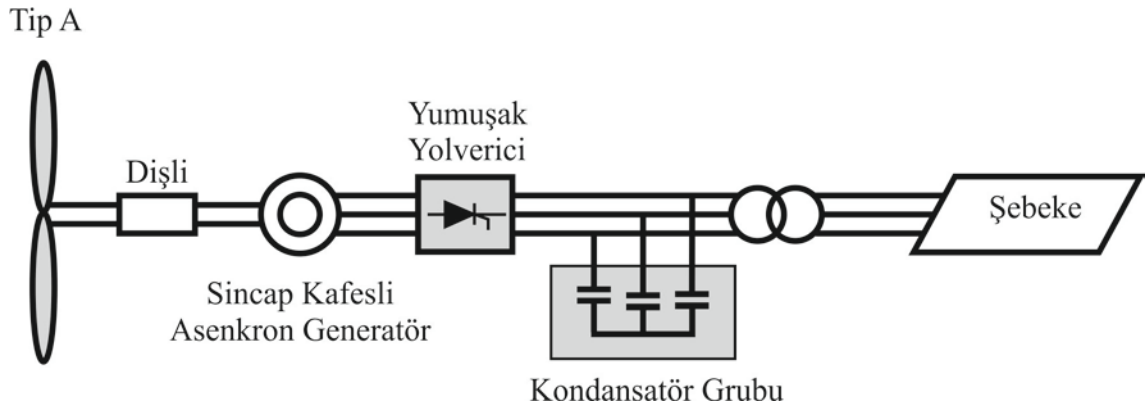
Şekil 1.12. Asenkron makinanın Moment-Hız/Kayma karakteristiği

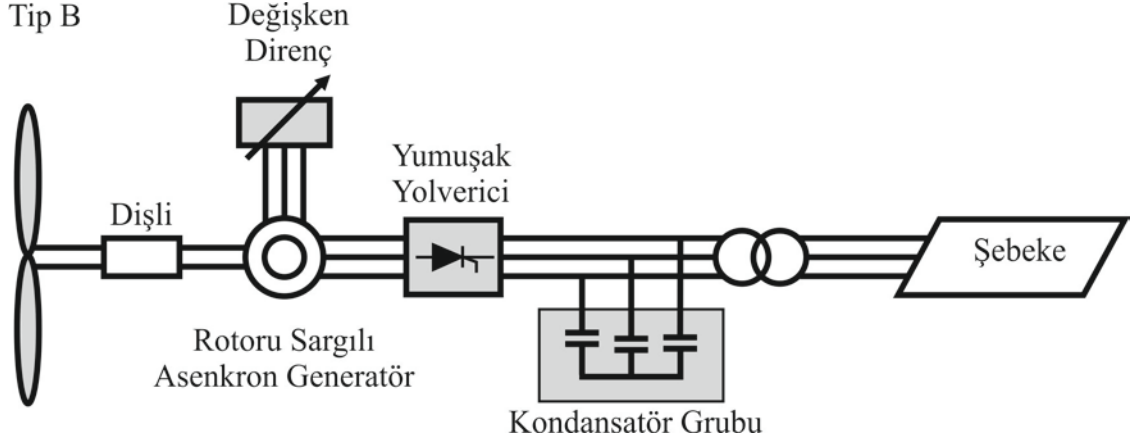
Şekil 1.12'de görülen motor karakteristiklerinden kaymaya bakılarak makinanın hangi şekilde çalıştığı anlaşılmaktadır. Eğer kayma negatif değerde ise makine generatör olarak çalışır. Kayma 0 ile 1 aralığında ise motor olarak çalışır. Kayma değeri 1'den büyük ise fren durumuna geçer.

1.4.2. Asenkron Generatör

Rüzgar türbinlerinde generatör olarak asenkron (indüksiyon) generatörler senkron (alternatör) generatörler ve doğru akım (şönt) generatörleri kullanılmaktadır. Doğru akım makinalarının fırça ve kolektörlere sahip olması nedeniyle bakım problemlerinin olması, verimlerinin düşük olması ve senkron ve asenkron generatörlere göre fiyat açısından da pahalı olmalarından dolayı yerlerini senkron ve asenkron generatörlere bırakmışlardır. Alternatif akım generatörlerinde maksimum dönme hızı ile elektrik üretimi için gerekli minimum hız arasındaki oran yüksektir. Böylece bir alternatif akım generatörünü süren bir rüzgar türbini daha geniş rüzgar hızı aralığında çalışabilecektir. Senkron generatörler asenkron generatörlere göre daha pahalıdır ve kontrol sistem bağlantıları daha karmaşıktır. Asenkron generatörler şebekeye senkron hızdan çok az farklı bir hız ile uyum gözetilmeksizin bağlanabilir ve bağlantı sonucunda oluşan aşırı yüklenme çok kısa sürelidir. Asenkron generatörün dezavantajı ise mıknatıslanma akımını şebekeden çekmesi ve böylelikle reaktif güç tüketmesidir. Yeni nesil türbinlerinin çoğunluğunda asenkron generatör kullanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron generatör kullanılmaktadır.

Asenkron makinaların iki tipi bulunmaktadır. Bunlar sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron makinalardır. Şekil 1.13'de iki farklı tip rüzgar türbini konfigürasyonları görülmektedir.





Şekil 1.13. Tipik rüzgar türbini konfigürasyonları

Rüzgar türbinlerinde en yaygın şekilde kullanılan generatör tipi asenkron generatördür. Sağlamlık ve mekanik basitlik gibi çeşitli avantajlara sahiptir ve çok sayıda üretildiği için maliyeti de düşüktür. Temel dezavantajı statorun reaktif bir mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasındır. Asenkron generatör sabit mıknatıslar içermez ve ayrı olarak uyarılmaz. Bu nedenle, uyarım akımını başka bir kaynaktan almalıdır ve reaktif güç harcar. Reaktif güç, şebeke ya da bir güç elektroniği sistemi tarafından sağlanabilir. Yalnızca şebekeye bağlandığı durumda, generatörün manyetik alanı oluşur.

Alternatif Akım (AA) uyarımı söz konusu olduğunda, oluşan manyetik alan, sargıdaki kutup sayısı ve akımın frekansı tarafından belirlenen bir hızda (senkron hız) döner. Bu nedenle, rotor senkron hızı aşan bir hızda dönerse, nispi bir hareket tarafından (kayma) dönen stator alanı ile rotor arasında bir elektrik alan indüklenir, bu da, rotor sargılarında bir akıma neden olur. Rotorun ilgili manyetik alanının stator alanıyla etkileşimi, rotor üzerinde momente neden olur.

Bir asenkron generatörünün rotoru, kısa-devre rotoru (sincap kafesli rotor) ya da sargılı rotor olarak tasarımılanabilir.

1.4.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)

Şekil 1.7’de gösterildiği gibi, Tip A konfigürasyonunun SKAG’si doğrudan şebekeye eşleşmiştir. Rüzgar hızındaki değişikliklerin neden olduğu generatör kaymasından dolayı, SKAG hızı yalnızca yüzde birkaç puan değişir. Bu nedenle bu generatör sabit-hızlı rüzgar

türbinleri için kullanılır (Tip A). Generatör ve rüzgar türbini rotoru bir dişli kutusu vasıtasıyla bağlanır.

SKAG'yi esas alan rüzgar türbinleri tipik olarak bir yumuşak yolverici (soft-starter) mekanizmasıyla ve reaktif güç harcaması için bir birimle donatılır çünkü SKAG'ler reaktif güç harcar. SKAG'ler dik bir moment-hız karakteristiğine sahiptir ve bu nedenle rüzgar gücündeki dalgalanmalar şebekeye doğrudan iletilir. Bu geçici rejimler özellikle rüzgar türbininin şebeke bağlantısı sırasında kritiktir, burada ilk anda akan akım sürekli durumda akan akımın 7-8 katı olabilir. Zayıf bir şebekede, bu yüksek akım ciddi gerilim bozulmalarına neden olabilir. Bu nedenle, SKAG'nin şebekeye bağlantısı, ilk anda çekilen akımı sınırlayacak şekilde yapılmalıdır.

Normal çalışma ve bir AA şebekesine doğrudan bağlantı sırasında, SKAG çok sağlam ve kararlıdır. Kayma değişir ve artan yüke bağlı olarak artar. Temel problem, şebekeden stator sargısına sağlanan mıknatıslanma akımından dolayı, tam yük güç faktörünün nispeten düşük olmasıdır. Bu, birçok güç dağıtım kurumunun düşük güç faktörleriyle yükleyen endüstriyel müşterileri cezalandırdığı gerçeğiyle ilişkilendirilmelidir. Açık bir şekilde, düşük bir güç faktöründe üretime burada izin verilemez. Çok düşük bir güç faktörü, generatöre paralel olarak kapasitör bağlanılarak kompanze edilir.

SKAG'lerde, aktif güç, reaktif güç, uç gerilimi ve rotor hızı arasında benzersiz bir ilişki vardır. Bu, yüksek rüzgarlarda, yalnızca generatör daha fazla reaktif güç çekerse, rüzgar türbininin daha fazla aktif güç üretebildiği anlamına gelmektedir. Bir SKAG için, harcanan reaktif güç miktarı kontrol edilebilir değildir çünkü bu güç miktarı rüzgar şartlarına göre değişmektedir. Reaktif gücü sağlamak için herhangi bir elektriksel bileşen olmaksızın, generatöre ilişkin reaktif güç doğrudan şebekeden alınmalıdır. Şebeke tarafından sağlanan reaktif güç ilâve iletim kayıplarına neden olur ve belirli durumlarda, şebekeyi kararsız duruma getirebilir. Kapasitör grupları ya da modern güç elektroniği çeviricileri reaktif güç harcamasını azaltmak için kullanılabilir. Temel dezavantaj, anahtarlama sırasında elektriksel geçici rejimlerin ortaya çıkmasıdır.

Bir arıza söz konusu olduğunda, herhangi bir reaktif güç kompanzasyon sistemine sahip olmayan SKAG'ler, şebeke üzerinde gerilim kararsızlığına neden olabilir. Elektriksel ve mekanik moment arasındaki dengesizlikten dolayı, örneğin, bir arıza meydana geldiğinde rüzgar türbini rotoru hızlanabilir (kayma artar). Bu nedenle, arıza

giderildiğinde, SKAG'ler şebekeden büyük oranda reaktif güç çeker, bu da gerilimde ilâve bir azalmaya neden olur.

1.4.2.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)

RSAG söz konusu olduğunda, rotorun elektriksel karakteristikleri dışarıdan kontrol edilebilir ve böylece bir rotor gerilimi uygulanabilir. Sargılı rotorun sargıları, kayan halkalar ve fırçalar ya da güç elektroniği cihazları (kayan halkaları ve fırçaları gerektirebilir ya da gerektirmeyebilir) vasıtasıyla bağlanabilir. Güç elektroniği kullanılarak, güç, rotor devresine uygulanabilir ve generatör, stator devresinden ya da rotor devresinden mknatıslanabilir. Bu nedenle, kayma enerjisinin rotor devresinden geri kazanılması ve statorun çıkışına beslenmesi de mümkündür. RSAG'nin dezavantajı SKAG kadar sağlam olmaması ve SKAG'den daha pahalı olmasıdır [21].

1.4.3. Sincap Kafesli Asenkron Makinanın Matematiksel Modeli

Bir sistemi gerçekleştirmeden önce sistemin çeşitli çalışma koşulları altında davranışının incelenmesi ve uygun kontrol kurallarının belirlenmesi istenir. Sistemin belli davranış kriterlerini sağlayabilecek kontrol sistemi geliştirilebilmesi için ve sistemin çeşitli parametrelere duyarlılığını ve doğrudan ölçülmeyen değişkenlerin davranışını belirlemek için sistemi en doğru şekilde temsil eden denklemlere ihtiyaç vardır. Bu noktada sistemin davranışını doğru olarak ifade eden matematiksel modeller kullanılır. Bir elektromekanik dönüştürücü olan asenkron makinanın davranışını verecek matematiksel modelin elde edilmesinde de elektrik ve mekanik kısma ilişkin olarak Kirchhoff ve Newton kanunlarından ve elektromekanik dönüşüm için enerji korunumundan yararlanılmıştır. Bu şekilde elde edilen sistemin modellenmesi ancak bazı varsayımlar altında mümkündür. Asenkron makinanın modellenmesinde yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir.

1. Stator sargıları stator çevresine düzgün yayılmış olup hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olarak değiştiği varsayılmıştır.
2. Üç fazlı stator sargıları çevreye 120° lik açı ile düzgün olarak yayıldığı varsayılmıştır.
3. Doyma, diş ve oluk etkileri ihmal edilmiştir.
4. Histerezis ve fuko kayıpları ihmal edilmiştir.
5. Magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılmıştır.

6. Akım yığılması ihmal edilmiştir.
7. Rotor çubuklarının çevreye simetrik yayıldığı varsayılmıştır.
8. Direnç ve endüktansların sıcaklık ve frekansla değişimleri imal edilmiştir.
9. Rotorun her çubuğu bir rotor faz sargısı olarak varsayılmıştır.

Sincap kafesli asenkron makinalar rotor çubukları kısa devre edildiği için kısa devre rotorlu asenkron makinalar olarak da bilinir. Bu makinalar genel olarak statoru 3, rotoru m fazlı bir yapıya sahiptir. Makinanın toplu parametrelili modeli oluşturulurken önce eşdeğer devre parametreleri tanımlanır.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_s & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_s \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0 \cdots & 0 \cdots & -R_\zeta \\ -R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0 \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_\zeta & 0 & 0 \cdots & R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_{rr} & \cdot & \cdot & M_{rr} \\ M_{rr} & L_r & \cdot & \cdot & M_{rr} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ M_{rr} & \cdot & \cdot & \cdot & L_r \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

Stator faz sargıları ile rotor çubukları arasındaki ortak endüktans matrisi makinanın açılal konumuna bağlı olarak Eşitlik (1.38)'deki gibidir.

$$[M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos p\theta & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \cos\left(p\theta + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

Rotor çubukları ile stator faz sargıları arasındaki karşıt endüktans Eşitlik (1.39)'daki gibidir.

$$[M_{rs}(\theta)] = [M_{sr}(\theta)]^T \quad (1.39)$$

Rotor ve stator endüktansları bir araya getirilirse (1.40) denklemleri elde edilir.

$$[L_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Akı, akım ve gerilimler vektörel formda aşağıdaki gibidir.

$$[I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rm} \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

$$[\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \psi_{r2} \\ \vdots \\ \psi_{rm} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

Stator ve rotor akı – akım bağıntıları ise Eşitlik (1.43)'teki gibidir.

$$\begin{aligned}
[\psi_s] &= [L_s][I_s] + [M_{sr}(\theta)][I_r] \\
[\psi_r] &= [L_r][I_r] + [M_{rs}(\theta)][I_s]
\end{aligned} \tag{1.43}$$

Stator ve rotor eşdeğer devre denklemleri için yukarıdaki denklemler kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$[V_s] = [R_s][L_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}\{[L_s][I_s] + [M_{sr}(\theta)][I_r]\} \tag{1.44}$$

$$0 = [R_r][L_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}\{[L_r][I_r] + [M_{rs}(\theta)][I_s]\} \tag{1.45}$$

Elektriksel kısım haricinde elektromekanik dönüşüm için gereken hareket denklemini ise Eşitlik (1.46)'daki gibidir.

$$M_e = \frac{1}{2} \left[[I_s]^T [I_r]^T \right] \frac{\partial}{\partial \theta} [L_{sr}(\theta)] \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \tag{1.46}$$

Son üç denklem takımı incelendiğinde sincap kafesli asenkron makinanın toplu parametrelili modeli 3 adet statoru, m adet rotoru ve 1 adet mekanik kısmı temsil eden diferansiyel denklemlerden oluşmuştur [26]. Modelin doğrusal olmayan çok sayıda diferansiyel denklemden oluşması nedeniyle analizler zorlaşmaktadır. Bunu çözmek için ise modelin uygun dönüşümler kullanılarak sadeleştirilmesi gerekir.

1.4.4. Sincap Kafesli Asenkron Makinanın d–q Eksen Takımı Modeli

Sincap kafesli asenkron makinalarda yapısal özelliklerden dolayı modellerdeki birtakım büyüklükler sürekli olarak değişim halindedir. Bu değişimler sistem giriş sinyallerinin genlikleri yanında frekanslarının da model incelenirken değerlendirilmesini gerektirir. Sistemin analizini kolaylaştırmak için asenkron makine duran eksen takımından senkron hızla dönen bir d – q eksen takımına taşınmıştır. Burada sistem d – q eksen takımına taşınarak durum değişkenleri

frekanstan bağımsız hale getirilmiştir. Yani V_{sd} ve V_{sq} büyüklükleri sırasıyla makinanın akısını ve momentini ifade eder hale gelmiştir.

Makinanın d – q eksen takımındaki eşitliği aşağıdaki denklemlerde görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R'_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L'_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L'_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s L_s & \omega_s L_m & 0 \\ \omega_s L_s & 0 & 0 & \omega_s L_m \\ \omega_r L_m & 0 & 0 & -\omega_r L_r \\ 0 & \omega_r L_m & \omega_r L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1.47)$$

$$M_e = pL_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (1.48)$$

Açısal frekans ω_s aşağıdaki gibidir.

$$\omega_s = \omega_r + p\omega \quad (1.49)$$

d – q eksen takımındaki akı akım arasındaki ilişki denklem (1.50) ve denklem (1.51)'de verilmiştir.

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \quad \psi_{rd} = L'_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (1.50)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \quad \psi_{rq} = L'_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (1.51)$$

Sistemin (0, d, q) stator ve rotor eksen takımlarına göre durum uzayı modeli;

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[-R_E i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R'_r}{L_r'^2} \psi_{rd} + p \omega \frac{L_m}{L_r'} \psi_{rq} + V_{sd} \right] \quad (1.52)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[-R_E i_{sq} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} - p \omega \frac{L_m}{L_r'} \psi_{rd} + \frac{L_m R'_r}{L_r'^2} \psi_{rq} + V_{sq} \right] \quad (1.53)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{R'_r L_m}{L_r'} i_{sd} - \frac{R'_r}{L_r'} \psi_{rd} + \omega_r \psi_{rq} \quad (1.54)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{R'_r L_m}{L_r'} i_{sq} - \omega_r \psi_{rd} - \frac{R'_r}{L_r'} \psi_{rq} \quad (1.55)$$

$$M_e = p \frac{L_m}{L_r'} (i_{sq} \psi_{rd} - i_{sd} \psi_{rq}) = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (1.56)$$

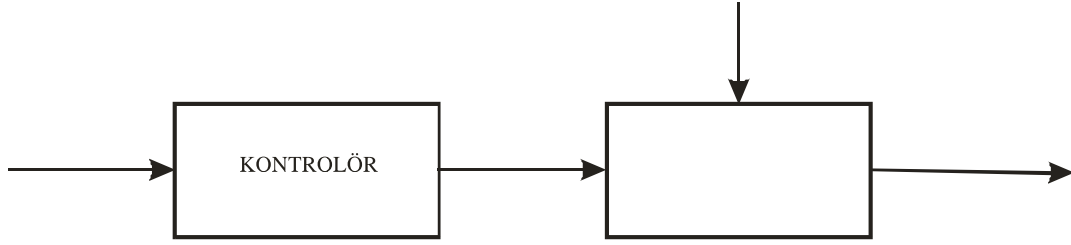
Sistemin d – q eksen modeli, dört adet stator ve rotor akımları ile bir adet açısal hız için olmak üzere 5 adet birinci dereceden denklemden oluşmaktadır [26].

1.5. Kontrol Sistemleri

Temelde klasik kontrol sistemleri açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol tekniklerinden oluşur. Kontrol sisteminin amacı sistemin değişkenlerini, belirli durumlarını istenen aralıkta gözlemlemek ve istenen denetleme işlemini uygulayarak sistemi istenen şekilde çalıştırmaktır. Bu esnada yapılan hatanın minimuma getirilmesi kontrol kalitesi ve doğruluğu bakımından önemlidir. Her sistemin bir giriş işareti vardır. Bu işaret sistemin istenen kontrol değeridir. Ayrıca algılayıcı ve ölçü aletleri ile dış ortandan alınan verilerde sisteme dahil edilebilir.

1.5.1. Açık Çevrimli Kontrol Sistemleri

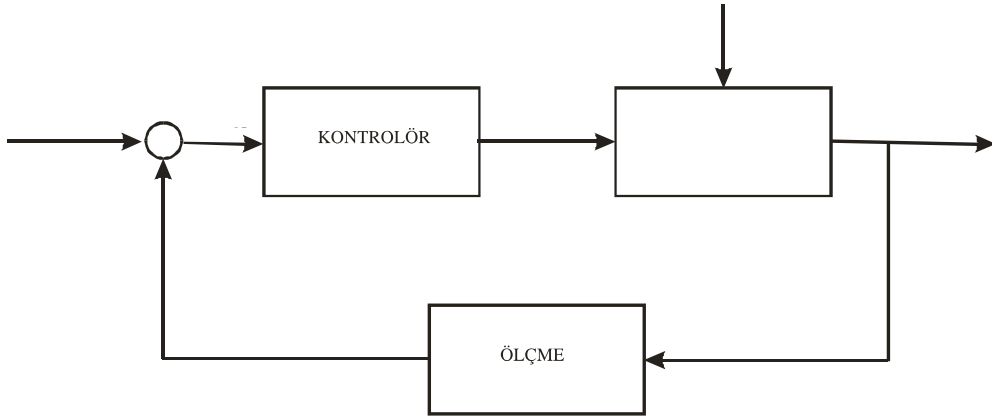
Kontrol edilen fiziksel büyüklüğün kontrol sistemine etkisinin olmadığı sistemlerdir. Bu sistemler kritik davranış koşullarını yerine getiremezler. Oldukça ekonomik sistemlerdir. Ancak hassas değildirler. Bu tür açık çevrimli kontrol sistemlerine basit ve ekonomik olmaları nedeniyle, çok sayıda karmaşık olmayan uygulamalarda rastlamak mümkündür. Denetleyici ve kontrol edilen sistem olmak üzere iki kısma ayrılırlar [27].



Şekil 1.14. Açık çevrimli kontrol sistemlerinin öğeleri

1.5.2. Kapalı Çevrimli Kontrol Sistemleri

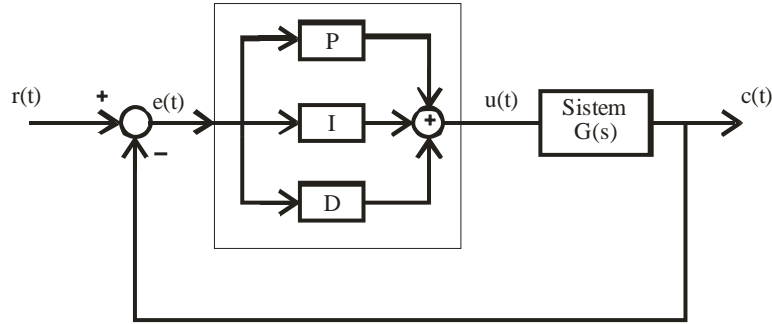
Açık çevrimli kontrol sistemlerinin hatasız ve iyi kontrolü için gerekli olan şey, sistem çıkışından girişine bir bağlantının oluşturulması ya da geri beslemedir. Daha hatasız bir kontrol elde etmek için, y kontrol edilen işaret geri beslenmeli ve referans işaretle karşılaştırılmalı, giriş-çıkış işaretleri farkı ile orantılı bir sürücü işaret, hatayı gidermek üzere, sisteme uygulanmalıdır. Burada tanımlandığı üzere bir veya daha çok geri besleme yoluna sahip bir sisteme kapalı çevrimli sistem denir. Şekil 1.15'de kapalı çevrimli sistemin yapısı görülmektedir [27].



Şekil 1.15. Kapalı çevrimli kontrol sistemi

1.5.3. PID Denetleyiciler

PID denetleyicili basitleştirilmiş kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 1.16'da görülmektedir.



Şekil 1.16. PID denetimli kontrol sistemi

Burada $r(t)$ referans giriş işareti, $u(t)$ denetleyici çıkışı, $c(t)$ sistem çıkışı ve $e(t)$ hata işaretidir. Bu hata işareti referans giriş ile sistem çıkış işareti arasındaki fark değeri elde edilerek bulunmaktadır. Bir PID denetleyici için $u(t)$ denetim sinyalinin sürekli zamanda Eşitlik (1.57)'deki gibi yazılması mümkündür [28].

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{e(t)}{dt} \right] \quad (1.57)$$

Aynı denetleyiciye ait transfer fonksiyonu bağıntısı s domeninde Eşitlik (1.58)'deki gibidir.

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.58)$$

1.6. Bulanık Mantık

Günlük hayatta rastgele kullandığımız birçok terim genellikle bulanık bir yapıya sahiptir. Bir şeyi tanımlarken, bir olayı açıklarken, komut verirken ve daha birçok durumda kullandığımız sözel veya sayısal ifadeler bulanıklık içerir. Bu terimlere örnek olarak; *yaşlı, genç, uzun, kısa, sıcak, soğuk, ılık, bulutlu, parçalı bulutlu, güneşli, hızlı, yavaş, çok, az, biraz, fazla, çok az, çok fazla* gibi daha pek çok sözel terim gösterilebilir. İnsanlar bir olayı anlatıp, bir durum karşısında karar verirken bu tür *kesinlik ifade etmeyen* terimler kullanır. .Kişinin yaş durumuna göre ona *yaşlı, orta yaşlı, genç, çok yaşlı ve çok genç* denir, Yolun kayganlık ve rampa durumuna göre arabanın gaz veya fren pedalına *biraz daha yavaş* veya *biraz daha hızlı* basılır. Çalışılan odanın ışığı yetersiz ise onu *biraz artırılır*, yeterinden fazla ise *biraz azaltılır*. Bütün bunlar insan beyninin belirsiz ve kesinlik içermeyen durumlarda nasıl davrandığına ve olayları nasıl değerlendirip, tanımlayıp, komut verdiğiine dair birer örnektir.

Bulanık mantığın ve bu mantık kurallarını kullanan bulanık küme teorisinin Lotfi' A, Zadeh tarafından geliştirilip 1965 tarihli makalesinde yayınlanmasından sonra belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesi yeni bir boyut kazanmıştır.1965'de ortaya atılmasına rağmen, bulanık küme kavramı ancak 1970li yılların ikinci yarısından sonra kullanılmaya başlanmıştır. Bunda özellikle Zadeh'in 1965'deki ilk makalesinden [29] daha fazla etkili olan ve bulanık mantığın belirsizlik içeren sistemlere uygulanabilirliğini açıklayan makaleleri etkili olmuştur. 1980li yılların ikinci yansından sonra Japonların ürünlerinde bulanık mantığı kullanmalarıyla da hız kazanarak günümüzdeki doruk noktasına gelmiştir. Artık hemen her alanda bulanık mantık uygulamalarına rastlamak mümkündür [30].

Bulanık Mantık (BM) matematiksel eşitlikler yerine sözel terimlere dayanan bir sistemin işlevsel kanunlarını ifade etmek üzere tasarlanmış bir yöntemdir. Pek çok sistem kesin matematik modellemesi yapılamayacak kadar karmaşıktır. Bunun nedeni bu sistemlerin lineer olmamasıdır. Fakat bulanık mantığın sözel ifadelerle dayalı olması böyle bir sistemin belirleyici özelliklerini tanımlayıcı elverişli bir yöntem sunar. Böylece kontrol edilecek sistem hakkında bilgi olmamasına rağmen sistem kontrol edilebilir. Bu sözel ifadeler, genelde mantıksal önermeler formundadır. Örneğin;

Eğer oda *soğuksa*, ısıtıcıyı *orta* kademeye ayarla.

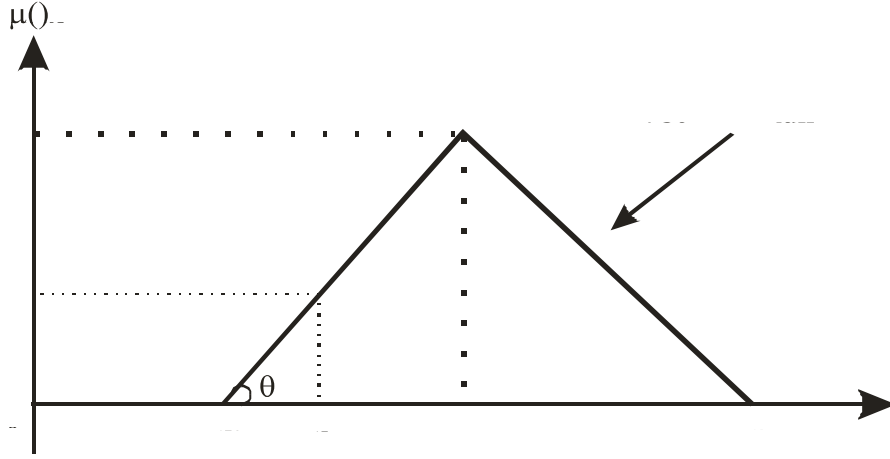
Soğuk ve *orta* tabirleri üyelik fonksiyonları olarak bilinen değerlerin kademelerini tanımlayan kümelerdir. Sistem soğuk olarak tabir edilen oda sıcaklık değerini ölçtüğü anda ısıtıcıyı orta kademede çalıştırarak oda sıcaklığını orta olarak belirlenen sıcaklık düzeyine getirecektir [31].

1.6.1. Üyelik Fonksiyonları

Bulanık denetleyici tasarımcıları değişik üyelik fonksiyonlarını kullanarak farklı denetleyiciler tasarlamaktadırlar. Yapılan tasarıma göre uygun üyelik fonksiyonunun seçimi önemlidir. Üçgen, yamuk, gaussian, çan, cauchy, sinüsoid ve sigmoid gibi üyelik fonksiyonları bulunmaktadır. Bu çalışmada yapısının basit olması nedeniyle ve doğrusal değişimli olduğu için üçgen biçimli üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

1.6.1.1. Üçgen Biçimli Üyelik Fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 1.17’de görülmektedir. Eşitlik (1.59) ve (1.60)’da bu üyelik fonksiyonuna ait eşitlikler görülmektedir.



Şekil 1.17. Üçgen biçimli üyelik fonksiyonu

$$\mu_A(x) = \max \left(\min \left(\frac{x - x_1}{x_T - x_1}, \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_T} \right), 0 \right) \quad (1.59)$$

$$\tan \theta = \frac{1}{x_T - x_1} = \frac{\mu_A(x)}{x - x_1} \quad (1.60)$$

1.6.2. Bulanık Mantık Denetleyici (BMD)

1.6.2.1. Bulanık Kontrol Giriş

İyi bir kontrol sistemi denetlenecek sistemin matematiksel modelinin uygunluğuna bağlıdır. İyi bir model kaliteli bir kontrol sistemi için çok önemlidir. Oysaki gerçek dünyada karşılaşılan sistemlerin çoğu doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle doğru matematiksel modellerinin çıkartılması zordur. Bu klasik kontrol sistemlerinde yapılan denetleyici ile bu sistemleri kontrol etmek zordur. İstenilen verim alınmadığı gibi zaman zaman çok pahalıya da mal olmaktadır. Bu tür sistemleri klasik kontrol teknikleri yerine bulanık mantık denetleyici kullanarak kontrol etmek gerekir. Bulanık mantık kontrolde sistemin matematiksel modeline ihtiyaç yoktur. Bulanık kontrol sistemlerinin tercih edilme nedenleri kısaca şöyledir:

1. Sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaz.
2. Sistemin doğrusal olması ya da olmaması önemli değildir.
3. Bulanık denetleyici ile sistem daha esnek çalışır. Sisteme müdahale etmeden yazılımı değiştirerek farklı şekillerde sistem kontrolü sağlanabilir.
4. Pek çok kereler klasik kontrol sistemlerinden çok daha iyi sonuç verirler.
5. Kontrol yazılım ile gerçekleştirildiği için kontrol sistemlerinde kullanılan diğer kontrol teknikleri de eklenerek daha karışık kontrol uygulamaları donanımdan bağımsız olarak gerçekleştirilebilir.
6. Daha verimli çalışırlar.

1.6.2.2. Bulanık Önermeler

Büyükliklerin sözel ifadeleridir. *eğer.....ise* yapısında ifadelerden oluşur.

Tek öneri:

Eğer A ise B \Rightarrow *A ise B* dir.

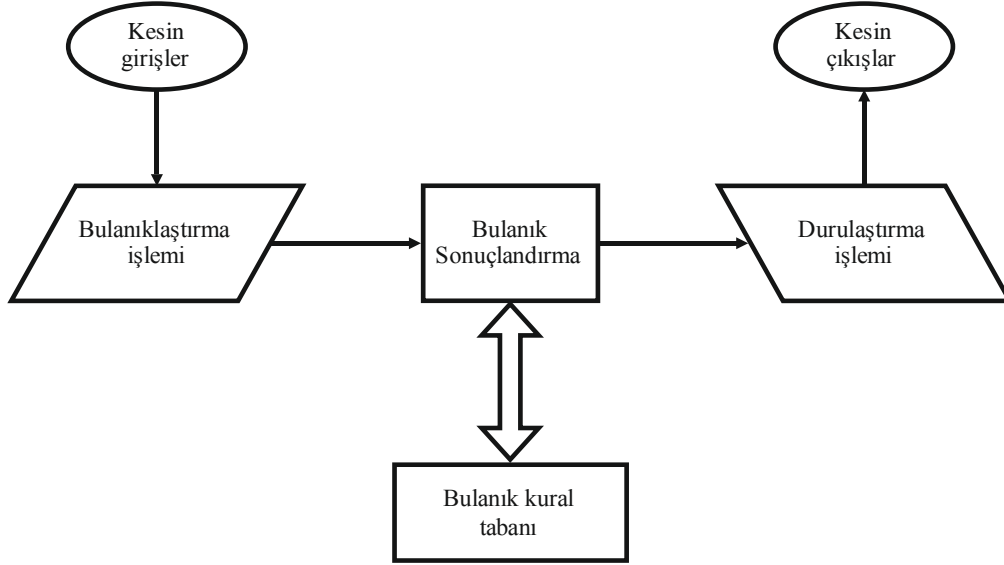
Birden fazla öneri:

Eğer A ise B değilse C \Rightarrow *A ise B* dir, değilse *C* dir.

1.6.2.3. Bulanık İşlemcinin Kısımları

Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı aşağıdaki gibidir. Temel olarak dört bölümden oluşur [31]:

1. Bulanıklaştırma bloğu
2. Bulanık kural tabanı
3. Bulanık Sonuçlandırma
4. Durulaştırma bloğu



Şekil 1.18. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı

1.6.2.3.1. Bulanıklaştırma Bloğu

Gerçek işaretler bu birimde bulanıklaştırılır. Yani giriş işaretleri sözel olarak (az, çok az, fazla, çok fazla...) ifade edilirler. Sayısal işaretleri bulanıklaştırmak için üyelik fonksiyonlarından (üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, gaussian üyelik fonksiyonu, çan biçimli üyelik fonksiyonu ...) yararlanır. Burada kullanılan üyelik fonksiyonlar ve değerleri programı yazan kişiye bağlıdır. Elde edilen tecrübelerden faydalanılarak seçim yapılır. Bir örnek verirse dış ortamda çalışan bir motordan alınan sayısal hız bilgisi bilgisayara aktarılır. Aktarılan sayısal bilgi sözel ifadelerle çevrilir, üyelik fonksiyonları tanımlanır. Giriş işareti bunların ışığı altında bulanıklaştırılır.

1.6.2.3.2. Bulanık Kural Tabanı

Kural tabanı ve veri tabanından oluşur. Bilgi ve düşüncelerin sözel ifadelerle temsil edilip saklandıkları bir birimdir. Bulanık verilerin saklandığı bir depo görevi gördüğünden aslında bulanık işlemcinin en önemli birimidir. *eğer ise* koşul cümleleri ile oluşturulan kurallar bulanık verilerin saklanmasını temin etmektedir. Bu bulanık veriler gözlem sonuçları ile birleştirildiğinde ortaya bir sonuç çıkar. Yani gözlemlerle elde edilen bir

veri daha önce kurallar dizisinde depolanmış verilerle birlikte kullanılıp yeni sonuç ve kararlar alınabilmektedir.

1.6.2.3.3. Bulanık Sonuçlandırma

Kurallara bağlı olarak elde edilen koşullardan gerekli sonuçların çıkarıldığı bölümdür. Burada kurallara bağlı olarak elde edilen pek çok sonuç birleştirilerek tek bir sonuca indirgenir. Burada mamdani, larsen, tsukamoto, sugeno, gibi sonuçlandırma metotları kullanılmaktadır. Mamdani ve larsen metotlarında alanlar hesaplanırken sugeno ve tsukamoto metotlarında ağırlıklı ortalamalar hesaplanmaktadır. Bu çalışmada mamdani sonuçlandırma metodu kullanılmaktadır.

Mamdani sonuçlandırma metodu minimum alma işlemidir. Her bir kural sonunda elde edilen sonuçlar arasında büyük olan alınarak işlem tamamlanır.

Kural 1: Eğer $x \in A_1$ ise ve $y \in B_1$ ise $z \in C_1$ dir.

değilse

Kural 2: Eğer $x \in A_2$ ise ve $y \in B_2$ ise $z \in C_2$ dir.

Gözlem: $x \in \overline{A_0}$ ve $y \in \overline{B_0}$ dir.

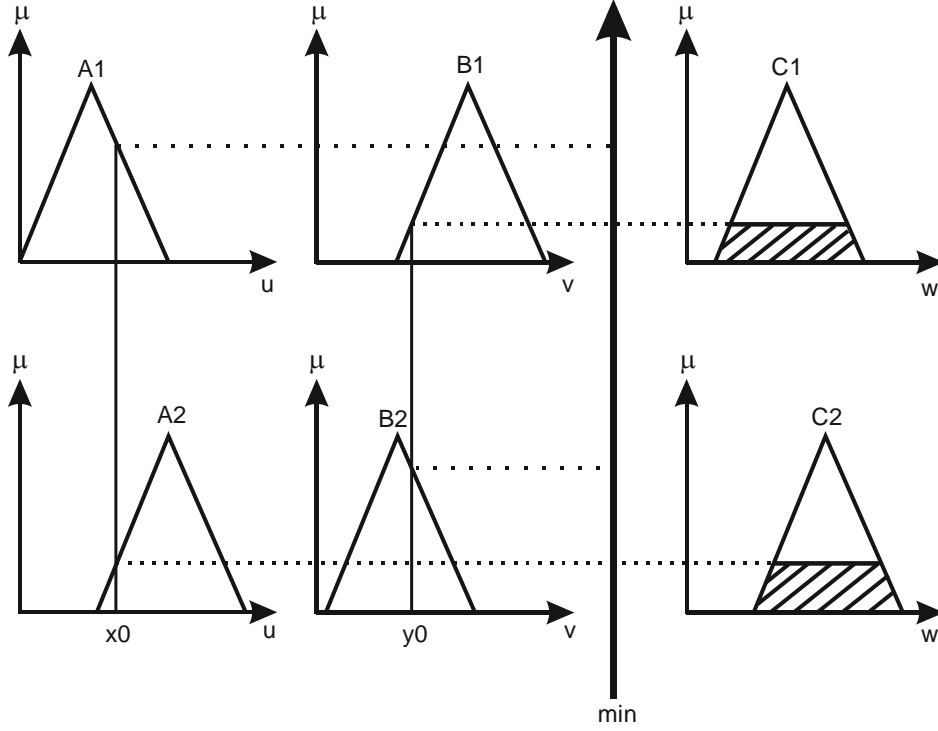
Sonuç: $z \in C$ dir.

$\alpha_i, i = 1, 2, \dots$ olmak üzere;

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) , \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (1.61)$$

$$C_1'(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) , C_2'(w) = (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \quad (1.62)$$

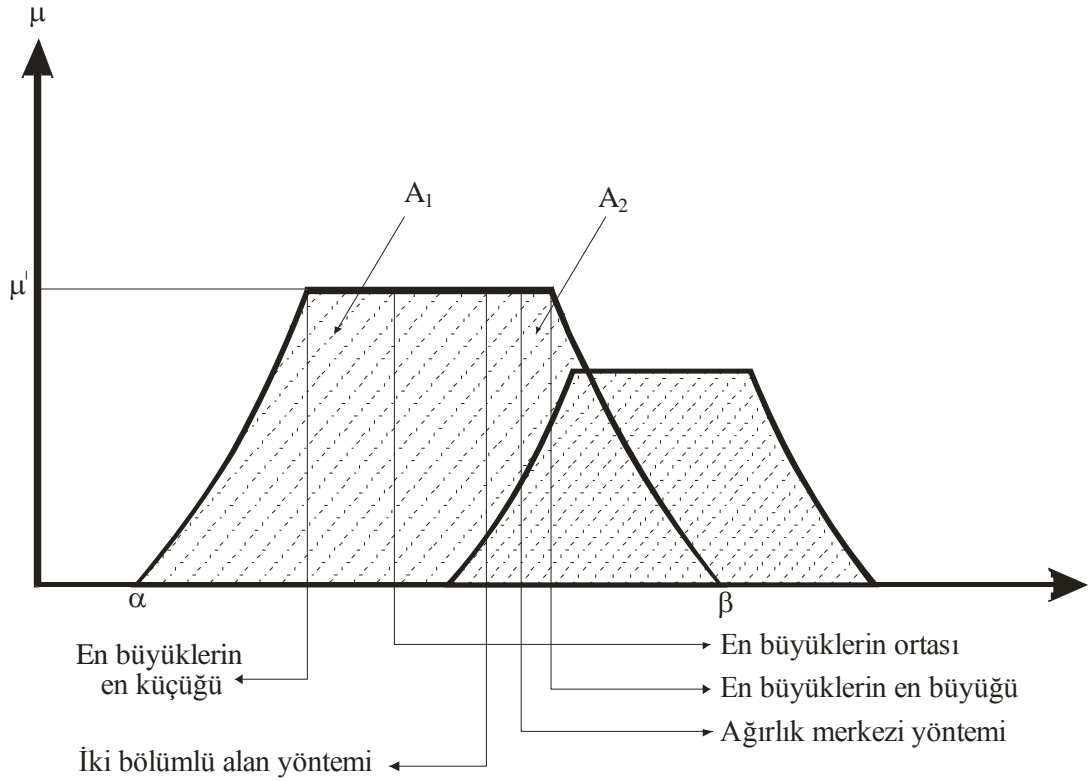
$$C(w) = C_1'(w) \vee C_2'(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \quad (1.63)$$



Şekil 1.19. Mamdani sonuçlandırma metodu

1.6.2.3.4. Durulaştırma Bloğu

Çıkarım motorunda elde edilen sonuç bulanıktır. Bu değerın sisteme uygulanabilmesi için kesin bir sayısal değere çevrilmesi gerekir. Yapılan işlem bulanık ifadeden kesin ifadeye dönüşüm işlemidir. Farklı şekillerde berraklaştırma işlemi yapılabilir. En çok kullanılan metotlar en büyüklerin ortası, ağırlık merkezi yöntemi, ortalama merkezi yöntemi ve iki bölümlü alan yöntemi metotlarıdır. Bu çalışmada hızlı ve basit bir yöntem olduğu için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır [30 - 34].



Şekil 1.20. Durulaştırma işlemi

Ağırlık Merkezi Yöntemine göre elde edilen kesin ifade eşitlik (1.64)'e göre bulunur.

$$Z_{COA} = \frac{\int_z \mu(z) \cdot z \cdot dz}{\int_z \mu_z dz} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i)} \quad (1.64)$$

1.7. Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM)

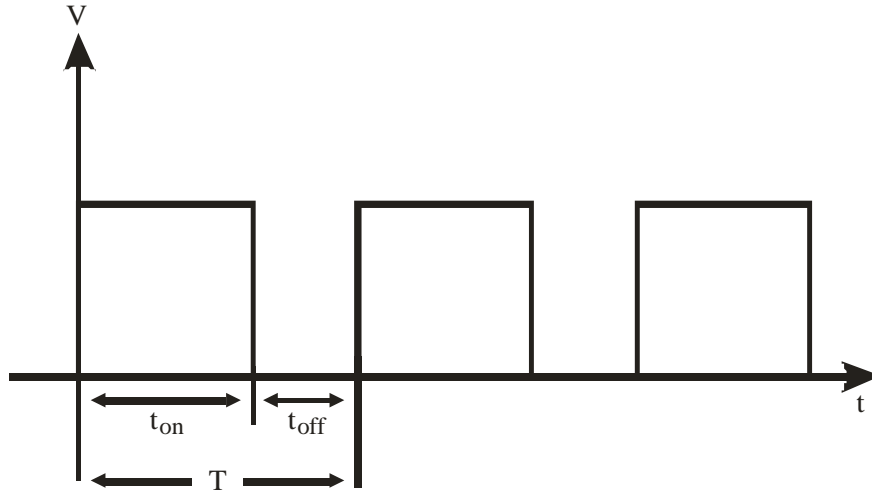
Darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation-PWM) belli frekanstaki bir sinyalin çalışma oranının başka bir giriş sinyali ile kontrol edilmesi olayına denir. Diğer bir deyişle eviricideki anahtarlama elemanlarının her dalga için anahtarlama sürelerinin ayarlanmasına, her dalgadaki tetikleme anlarının artırılmasıyla ve azaltılmasıyla oluşan

işaretlerin denetlenmesine darbe genişlik modülasyonu denir. Bu yöntemde giriş gerilimi ve çıkış yükü değişse bile çıkış geriliminin ortalaması istenen değerde tutulabilir.

Mevcut yöntemlerden biri anahtarlama frekansını (DGM'nin periyodunu $T=t_{on}+t_{off}$) sabit tutmak ve anahtarın t_{on} süresini değiştirerek, ortalama çıkış gerilimini istenilen düzeyde ayarlamaktır. Bu yöntem sabit frekans yöntemi olarak tanımlanır. Burada ayarlanan t_{on} süresinin T periyot süresine oranı anahtar çalışmasındaki darbe periyot oranıdır ve duty (D) olarak tanımlanır.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1.65)$$

Diğer bir kontrol yöntemi ise değişken frekans yöntemidir. Bu yöntemde Doğru Akım (DA) eviricinin frekansı yani periyodu değiştirilir ve bu değişim sırasında t_{on} veya t_{off} sabit tutulabilir. Darbe/Periyot Oranı'nı kontrol eden bu yöntem frekans modülasyon yöntemi olarak anılır.



Şekil 1.21. Darbe genişlik modülasyonu (DGM)

Frekans modülasyonu darbe genişlik modülasyonu ile karşılaştırdığında şu dezavantajlara sahiptir.

1- Frekans modülasyonunda çıkış gerilimini kontrol edebilmek için DA kıyıcı frekansı geniş bir alan içerisinde değiştirilmelidir. Böyle bir geniş frekans değişikliği içinde filtre oluşturmak oldukça zordur.

2- Geniş frekans bandında yeterli filtre sağlanamayacağından çeşitli işaretler ile istenmeyen parazitlerin ortaya çıkma ihtimali yüksektir.

3- DA kıyıcının kesimde olduğu t_{off} süresinin uzun tutulması yük akımının sürekliliğini engelleyen bir durum oluşturur. Bu da DA kıyıcılarında motor akımının kesintili olmasına neden olur. Böyle bir çalışma motorun vurutulu çalışmasına neden olacağından istenmeyen bir durum ortaya çıkar. Bu durumda DGM yöntemi frekans modülasyon yönteminden daha iyidir.

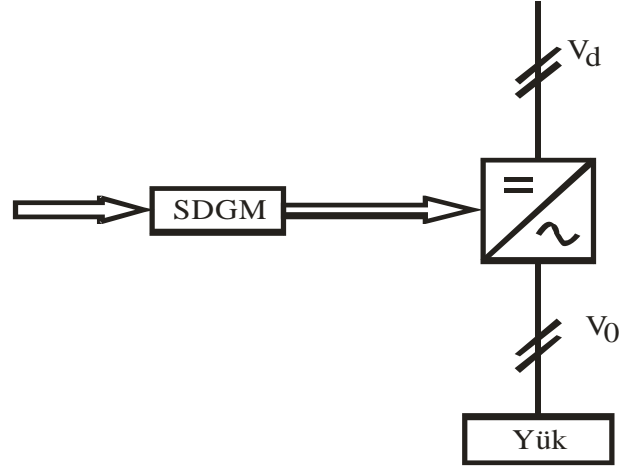
Kare dalga eviricilerde, giriş geriliminin DGM tekniği kullanılmadan ayarlanması ile yapılan uygulamalarda anahtarlama güçlükleri meydana gelir. Çünkü anahtarlama için gerekli olan söndürme kondansatörlerinin gerilimi, doğrudan evirici girişindeki DA gerilim ile orantılıdır. Doğru akım ara devresinin küçük gerilimlerde dahi tam yük akımını söndürebilmek için anahtarlama düzenlerinin oldukça büyük seçilmeleri gerekir. Bu durum ise evirici devrelerine ek maliyetler yükler. Bu sorunları ortadan kaldırmanın bir yöntemi de doğrultucudan sağlanan DA geriliminin DGM yöntemiyle kesilerek çıkışta elde edilen gerilimin temel bileşenlerinin evirici içerisinde kontrol edilmesidir. Diğer bir deyişle evirici girişindeki DA gerilimi değiştirmeksizin, evirici çıkış geriliminin DGM yöntemiyle ayarlanmasıdır.

Ayrıca bir periyot içinde anahtarlama elemanları birçok kez uygun darbe periyot oranı değerlerinde uygulanarak harmonik bastırma işlemlerinde uygulanabilir. Bu yöntemin en olumsuz özelliği doğrultucudan sağlanan doğru gerilimden tam olarak faydalanılamamasıdır. Bu olumsuzluk, faz gerilim dalgasına fazlar arası gerilim üzerinde bozucu etkisi olmayan bir miktar ilave etmekle azaltılabilir. Çünkü 3. harmonikler sistemin 3 fazlı olması nedeniyle fazlar arası gerilimde bastırılmış olacaklardır. Bunun sonucu olarak DA kaynak geriliminden daha fazla faydalanma imkânı sağlanır.

DGM kontrolünde iki yaklaşım söz konusudur. Kontrol sistemi, gerilim kontrollü DGM ya da akım kontrollü DGM kontrol metotlarından oluşur. Literatürde gerilim kontrollü DGM açık döngü kontrol tekniği, akım kontrollü DGM ise kapalı döngü kontrol tekniği olarak da adlandırılır.

1.7.1. Gerilim Kontrollü DGM

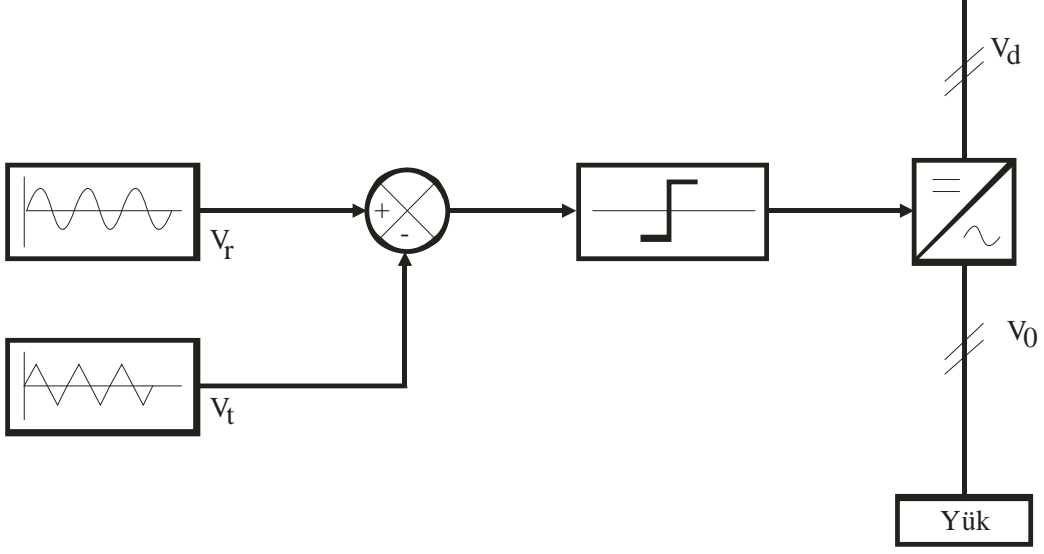
Açık kontrol tekniğinde bir referans giriş gerilimi alınarak sistemin sürekliliği gerçekleştirilir. Bu teknikte alınan giriş referans gerilimi işaretin farklı bir üçgen dalga işareti ile karşılaştırılması sonucu taşıyıcı temelli DGM oluşur.



Şekil 1.22. Gerilim kontrollü DGM blok seması

1.7.1.1. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM)

Bu yöntem, referans işaret olarak bir sinüs dalgası kullanıldığı için Sinüzoidal DGM (SDGM) olarak anılmaktadır. Şekil 1.23’de kontrol blok şemasında gösterildiği gibi evirici çıkışının gerilimini ve frekansını belirleyecek bir sinüs referans işareti, frekans ve genliği sinüs işaretinden daha büyük bir üçgen dalga işareti ile karşılaştırılır. Bu iki işaretin kesiştiği noktalarda evirici içindeki aynı koldaki anahtarlama elemanları durum değiştirirler [35].

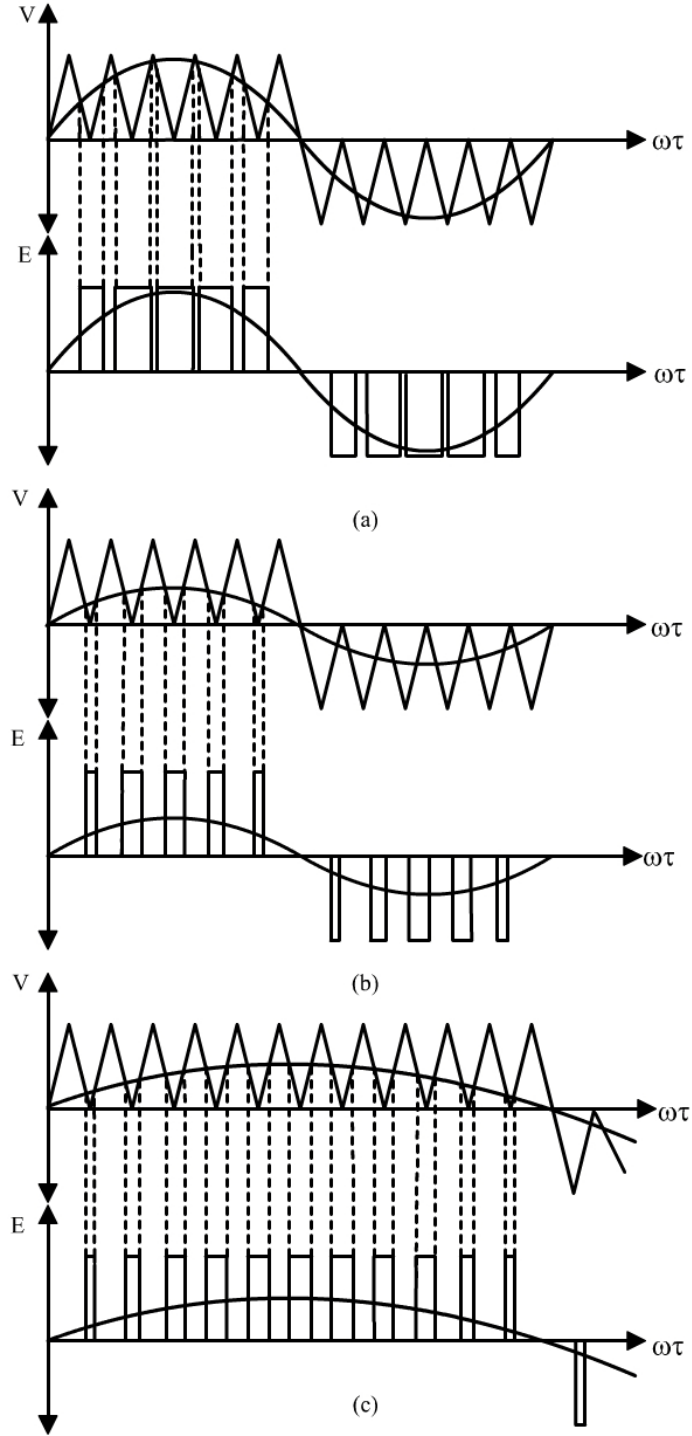


Şekil 1.23. SDGM kontrol blok şeması

Şekil 1.23’de tek fazlı köprü bir evirici için DGM işaretleri, referans sinüs işareti ile taşıyıcı üçgen dalganın kesişim noktaları ile belirlenir. Şekilden de görüleceği gibi çıkış frekansı sinüs işaretinin frekansındır. Dolayısıyla çıkış frekansını, sinüs işaretinin frekansını değiştirerek ayarlayabiliriz. Evirici çıkış gerilimini azaltmak veya yükseltmek için referans sinüsün genliği azaltılır veya yükseltilir.

Şekil 1.24’de farklı genlikli sinüs işaretiyle oluşan çıkış görülmektedir. Referans işaret olarak kare dalga kullanılsaydı, üretilen dalganın darbelerinin genişlikleri birbirine eşit olacaktı. Oysa sinüs kullanılarak, herhangi bir andaki darbe genişliği bu sinüs eğrisinin o andaki kapladığı alanla orantılı olması sağlanmış oldu. Bu da bize temel bileşeni bir sinüs olan çıkış sağlamaktadır.

Darbe genişliklerinin sinüsün bir fonksiyonu olarak değişmesi, bozulma faktörü ve düşük mertebeli harmoniklerin önemli oranda azalmasına neden olur. Bu yüzden bu yöntem endüstride yaygın olarak kullanılır ve kısaca SDGM denilir.



Şekil 1.24. SDGM işaretleri üretilmesi ve oluşan çıkış işareti

- a) Sinüs referansı maksimum genliğe sahip
- b) Sinüs referansı yarı genliğe sahip
- c) Sinüs referansı yarı genliğe ve yarı frekansa sahip

Taşıyıcı dalga üçgen biçimli bir dalgadır. Genliği V_t ve frekansı f_t olsun. Bu frekans işaretimiz bir sinüs dalgası olup, taşıyıcı frekans olarak da adlandırılabilir. Referans işaretimiz bir sinüs dalgası olup, kontrol işareti olarak da adlandırılmaktadır. Kontrol işareti V_r genlikli ve f_r frekanslı olsun. Bu frekansa modülasyon frekansı da denilmektedir. Referans işaretinin frekansına göre taşıyıcı frekansı çok daha büyüktür ve genelde taşıyıcı frekans sabit tutulur. Kontrol işaretinin tepe genliği V_{rm} üçgen dalganın tepe genliği V_{tm} (genelde sabittir) olsun. Buradan; V_{rm}/V_{tm} oranına modülasyon oranı (genlik modülasyon oranı, modülasyon indeks) denir ve m_a ile gösterilir. f_t/f_r oranına ise frekans modülasyon oranı denir ve m_f ile gösterilir [36].

1.7.2. Akım Kontrollü DGM

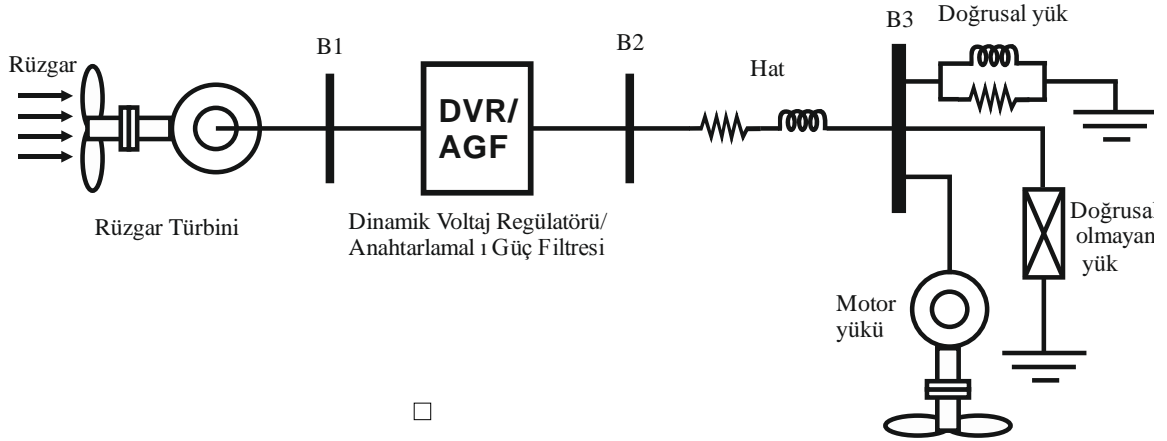
Bu kontrol metodu aynı zamanda kapalı döngü DGM kontrol tekniği diye de adlandırılır ve stator vektör akımı için ya da stator akı vektörü için bir geri döngü kontrol yapılarak gerçekleştirilir. Akım kontrollü DGM, geleneksel gerilim kaynaklı DGM'ye kontrol çıkış akımı sağlamak amacıyla akım-düzenleme (ayarlama) döngülerinin eklenmesi ile oluşturulur. Bu kontrol tekniği lineer olmayan yükler için yeterince hızlıdır.

Akım kontrolü değişik formlarda olabilir. Genellikle sinüzoidal bir referans akım dalga şekli üretilir ve bu dalga motorun gerçek ölçülen akımı ile birlikte karşılaştırıcıyı besler. Eğer motorun faz akımı, referans akım değerinden daha pozitif ise üst kısımdaki elemanlar kesime, alt kısımdaki elemanlar iletme geçerek motorun akımının azalması sonucunu doğurur. Karşılaştırıcı ölü bant (histerisiz) genişliği vardır. Bu bant eviricinin anahtarlamaya başlamadan önceki izin verilen referans akım ile gerçek akımı arasındaki farkı belirler. Böylece gerçek akım, referans akımı, faz gecikmesi ve önemli hata büyüklüğü olmadan izler. Üç fazlı sistemlerde, genellikle her faz için ayrı akım kontrolü vardır. Evirici bacağındaki anahtarlamamanın başarısı için anahtarlar arasında gecikme oluşturan standart harici bir devreye ihtiyaç vardır [37].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Sistemin Ana Yapısı

Şekil 2.1’de sistemin tek hat şeması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi rüzgar türbini ile elde edilen enerji değişken yüklere aktarılmaktadır. B1 barası ile B2 barası arasında görülen DVR/AGF bloğu bu tezin asıl çalışma amacıdır. Rüzgar türbinlerinden tüketiciye aktarılan enerjinin kalitesi rüzgar hızının değişken olması sebebiyle iyi değildir. Aynı zamanda yüklerde meydana gelen sürekli değişimler enerjinin kalitesini doğrudan etkilemektedir ve yük üzerindeki gerilimin kararsız olmasına neden olmaktadır. Bu blok ile rüzgar türbininden yükler enerji aktarılırken, aktarılan enerjinin kaliteli ve yükler üzerindeki gerilimin kararlı olması amaçlanmıştır.



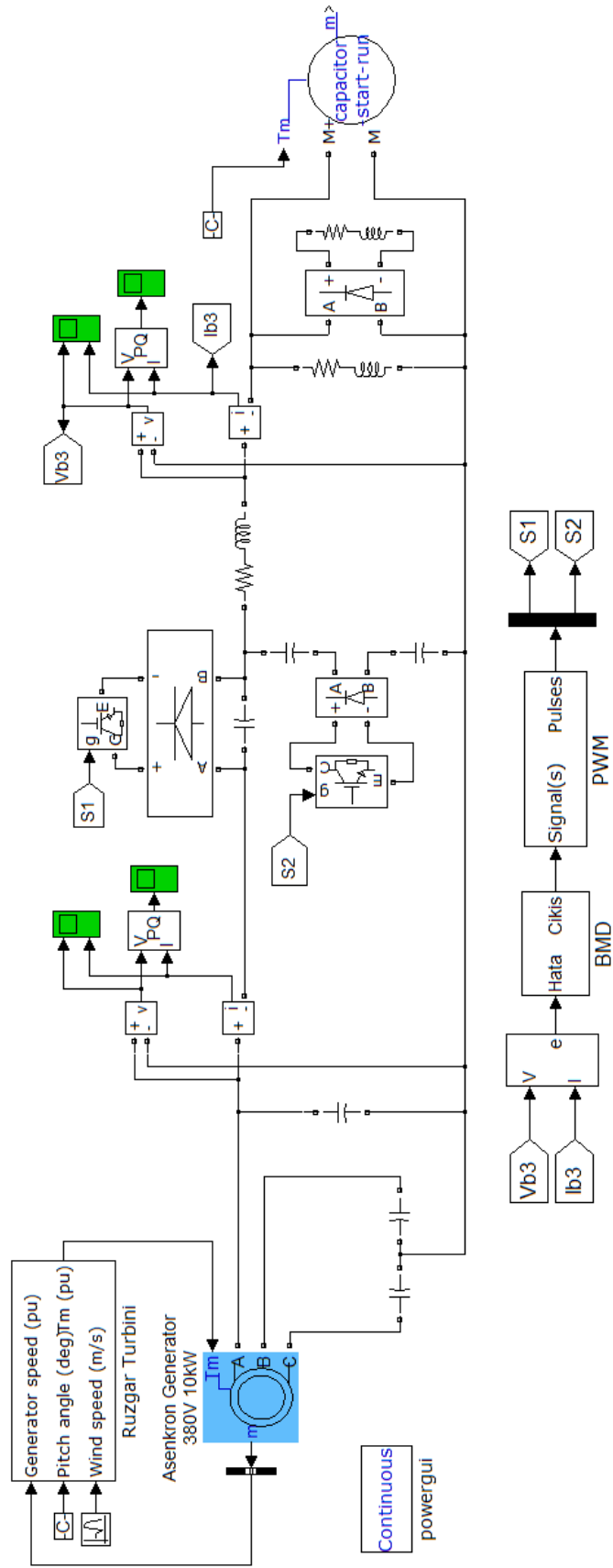
Şekil 2.1. Sistemin tek hat şeması

Sistemde kullanılan rüzgar türbini nominal hızı 10 m/s ve 10 kW güç değerinde olan bir türbindir. Rüzgar türbininde kullanılan sincap kafesli asenkron generatör 10 kW, 3 – faz, 380 V, 50 Hz değerinde olan bir üretçidir. Tablo 1’de, kullanılan generatörün parametreleri görülmektedir.

Tablo 1. Asenkron generatör parametreleri

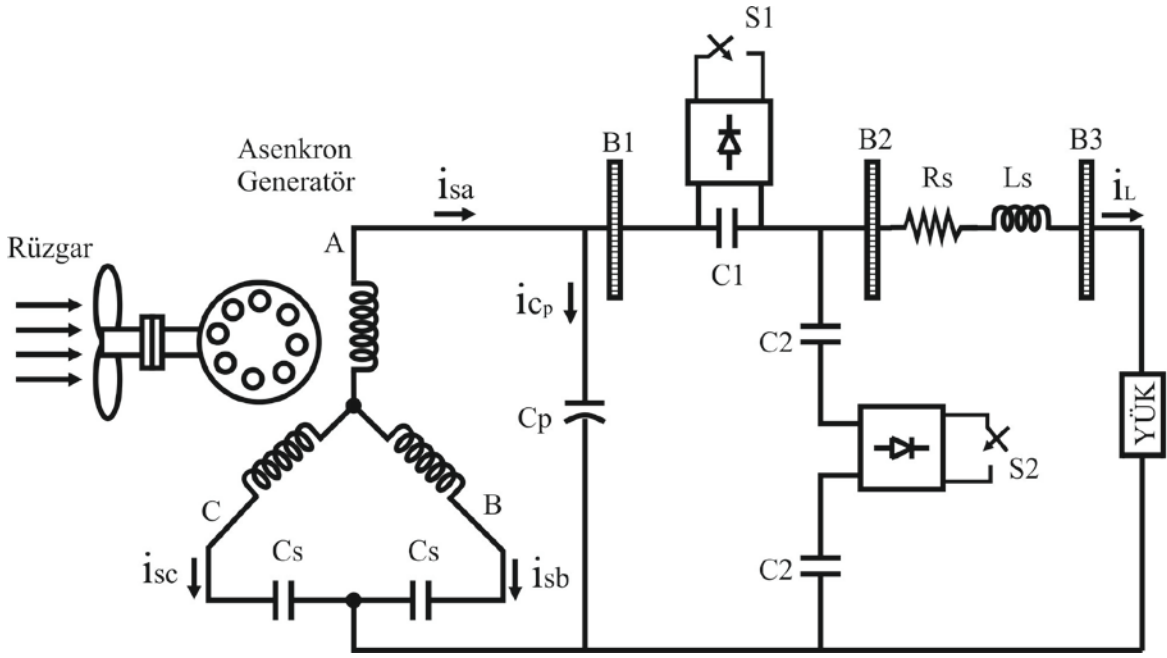
Nominal güç	10 kW
Gerilim (faz – faz)	380 V
Frekans	50 Hz
R_s (pu)	0.016
L_s (pu)	0.06
R_r' (pu)	0.015
L_r' (pu)	0.06
L_m (pu)	3.5
[H(s) F(pu) p()]	[2 0 2]

Benzetimi yapılan sistemin Matlab/Simulink modeli Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Benzetimi yapılan sistem

Sistemin açık blok diyagramı ise Şekil 2.3’de verilmektedir. Rüzgar türbininde kullanılan üç fazlı sincap kafesli asenkron generatör öncelikle kondansatörler yardımı ile tek faza indirgenmektedir. B1 barası ile B2 barası arasında, önerilen DVR/AGF bloğunun açık gösterimi verilmektedir. B2 barası ile B3 barası arasında bir iletim hattı kullanılmıştır. Bu iletim hattını modellemek için bir RL elemanı hatta seri olarak bağlanmıştır. $R_s=1\Omega$ ve $L_s=1mH$ olarak alınmıştır [38]. Daha sonra B3 barası ile yükler enerji aktarımı yapılmaktadır.



Şekil 2.3. Sistemin blok diyagramı

Şekil 2.3’de sistemin blok diyagramında görüldüğü gibi generatörün sargılarına yıldız şeklinde bağlı Cs ve Cp kondansatörleri ile üç fazlı asenkron generatör tek faza indirgenmektedir. B ve C fazları Cs kondansatörleri ile birbirlerine bağlanarak orta noktaları ile A fazı kullanılarak tek faza sağlanmaktadır. B1 barası ile B2 barası arasında görülen DVR/AGF, C1 ve C2 kondansatörleri ile S1 ve S2 anahtarlarından oluşmaktadır.

Tablo 2. Kondansatör parametreleri

Cs	35 μ F
Cp	200 μ F
C1	60 μ F
C2	160 μ F

Sistemde kullanılan kondansatör değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Burada kullanılan kondansatörler için yaklaşık değerler aşağıdaki şekilde hesaplanır. Asenkron generatör için $\cos\varphi$ değeri 0,84 alınarak yapılan hesaplamada reaktif güç değeri eşitlik (2.4)’de verilmiştir.

$$S_{3\phi} = \frac{P_{3\phi}}{\cos\varphi} \quad (2.1)$$

$$S_{3\phi} = \frac{10000}{0,84} = 11900VA \quad (2.2)$$

$$Q_{3\phi} = S_{3\phi} \cdot \sin\varphi \quad (2.3)$$

$$Q_{3\phi} = 11900 \cdot 0,54 = 6450VAr \quad (2.4)$$

Tek faz için reaktif güç değeri:

$$Q_{1\phi} = \frac{6450}{3} = 2152VAr \quad (2.5)$$

$$I_c = \frac{Q_1}{V_{3\phi}} \quad (2.6)$$

$$I_C = \frac{2152}{380} = 5,66A \quad (2.7)$$

$$X_C = \frac{V}{I_C} \quad (2.8)$$

$$X_C = \frac{380}{5,66} = 67,09\Omega \quad (2.9)$$

$$C = \frac{1}{2\pi fX_C} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.50.67,09} = 48\mu F \quad (2.11)$$

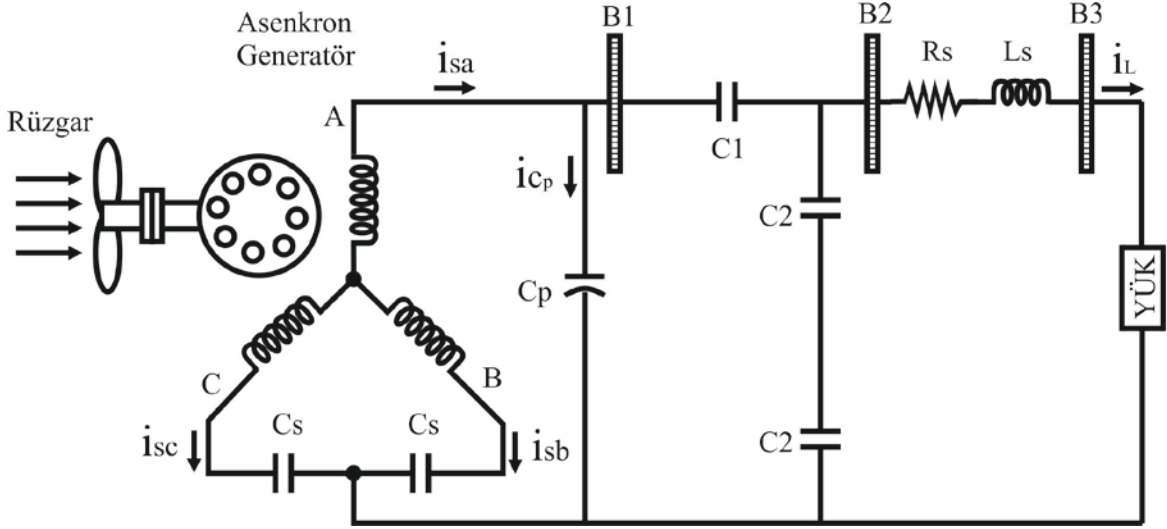
Üçgen bağlantı olarak bulunan bu değer üçgen-yıldız dönüşümü ile hesaplanırsa $C = 16\mu F$ bulunur. Burada kullanılan kondansatörlerin değerlerinin farklı bir metotla hesaplanması EK-1'de verilmektedir. Bulunan $C = 16\mu F$ değeri bu kondansatörler için minimum değerdir. Kullanılan Cs kondansatör değeri sistem frekansını 50Hz'de tutacak şekilde $Cs = 35\mu F$ seçilerek benzetim yapılmıştır.

Asenkron generatörün reaktif güç değeri 6450Var olduğu için buradan hareketle Cs kondansatörünün hesabına benzer şekilde sisteme paralel düşen Cp kondansatörünün değeri en az 142 μF olarak hesaplanmaktadır. Bu sistem için 200 μF kullanılmıştır.

C1 kondansatörü seri kompanzasyon amacı ile sisteme seri olarak yerleştirilmiştir ve asıl amacı iletim hattın kaynaklanan etkilerin azaltılmasıdır. Bu hatta bağlanan baralar arasındaki dönüşüm reaktanslarını azaltır, iletilen maksimum gücü artırır ve etkin reaktif güç kaybını azaltır. Seri kapasitörler genellikle gerilim kontrolü için kullanılmadıkları halde reaktif güç dengesinin ve gerilim kontrolünün düzeltilmesine katkıda bulunurlar [39]. C2 kondansatörü ise yükler üzerindeki endüktif gücün etkisinin azaltılması için konulmaktadır ve yük durumuna göre bu kondansatörün değeri anahtarlamalar ile değiştirilmektedir.

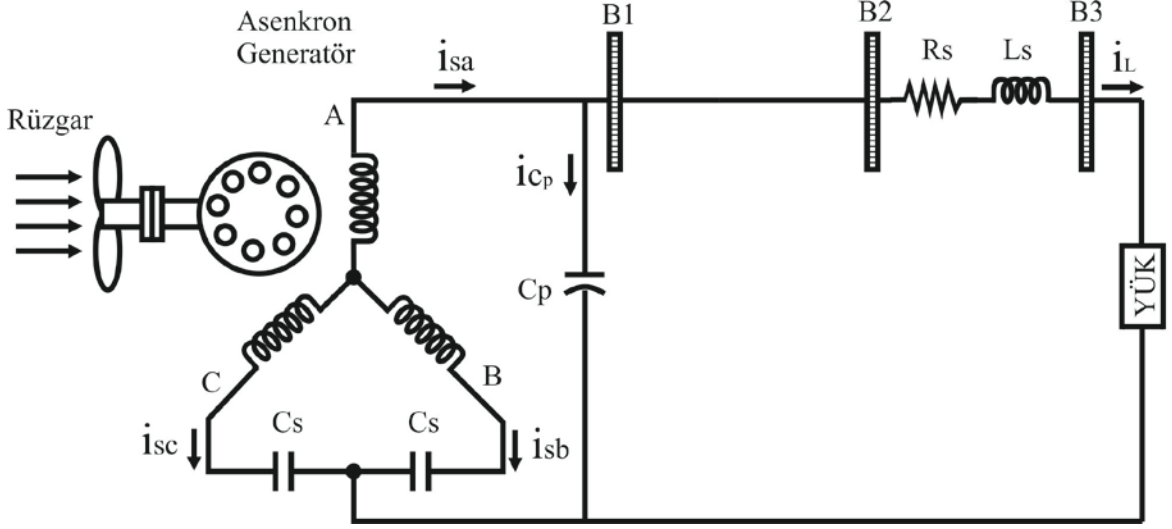
2.2. Sistem Denetimi

C1 ve C2 kondansatörleri devreye alınırken ve devreden çıkarılırken kullanılan S1 ve S2 anahtarları aynı anda açık veya aynı anda kapalı durumda olamaz. Sistemde elektronik anahtar olarak IGBT elemanı kullanılmıştır. Anahtarlardan biri açıkken diğeri kapalı konumdadır. Yani birbirinin tersi ($S1 = \overline{S2}$) durumda çalışmaktadır. Örneğin S1 anahtarı açık konumda iken S2 anahtarı kapalı konumdadır. Bu durumda C1 kondansatörü ile C2 kondansatörleri devrededir. Tersisi durumda iken yani S1 anahtarı kapalı iken C1 kondansatörü devrede değildir. S1 anahtarı kapalı iken S2 anahtarı açık olacağı için C2 kondansatörleri de aynı şekilde devrede değildir.



Şekil 2.4. S1 anahtarı açık, S2 anahtarı kapalı konumda iken sistemin blok diyagramı

Şekil 2.4'de görülen blok diyagram S1 anahtarı açık, S2 anahtarı kapalı konumda olduğu durumu gösterir. Anahtarlar bu konumlarda iken Şekil 2.4'de görüldüğü gibi S1 anahtarının açık olması demek C1 kondansatörünün devrede olması demektir. Aynı anda kapalı konumda bulunan S2 anahtarı ise C2 kondansatörlerinin de devrede olduğunu gösterir. Yani anahtarlar bu konumlarda iken kondansatörlerin hepsi devrededir.

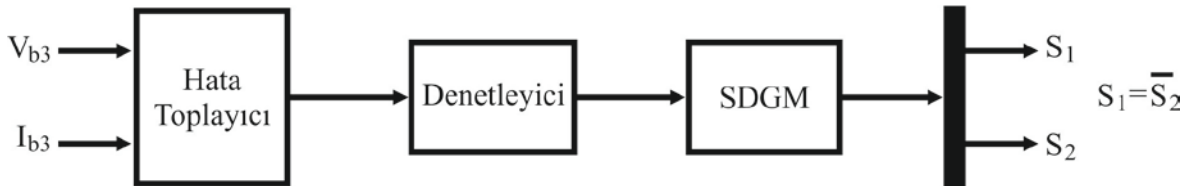


Şekil 2.5. S1 anahtarı kapalı, S2 anahtarı açık konumda iken sistemin blok diyagramı

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi S1 anahtarı kapalı, S2 anahtarı açık konumdadır. Bu durumda S1 anahtarı kapalı olduğu için C1 kondansatörü kısa devre olacağından devre dışıdır. Aynı anda S2 anahtarı açık konumda olduğu için de C2 kondansatörleri de devre dışıdır. Yani anahtarlar bu konumlarda iken hem C1 hem de C2 kondansatörleri devre dışıdır.

2.3. Anahtarlama Kontrol Algoritması

Sistemdeki C1 ve C2 kondansatörlerini devreye alıp devreden çıkarmak için kullanılan bu anahtarlama sinyalleri Şekil 2.6’da görülen alt sistemden üretilmektedir.

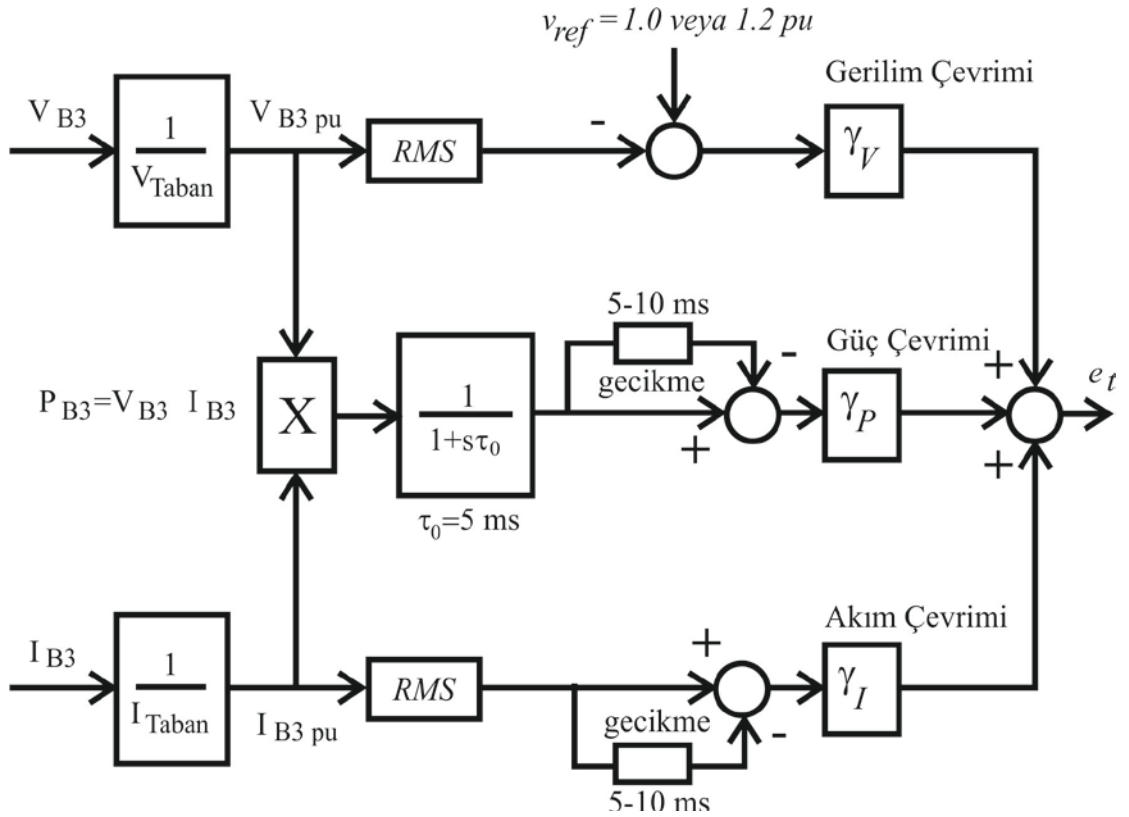


Şekil 2.6. Anahtarlama sinyallerinin üretildiği alt sistem

B3 barasındaki gerilim ve akım bilgisi anlık olarak üç çevrimli hata toplayıcısına gönderilmektedir. Hata toplayıcısı girilen akım ve gerilim ve dolayısıyla güç bilgilerinin hata değerlerini toplayarak toplam hata değerini oluşturmaktadır. Oluşturulan bu hata değeri denetleyiciye aktararak hatanın sifıra çekilmesi sağlanmaktadır. Denetleyici bu hata değerini sıfırlamak için SDGM'ye gerekli olan anahtarlama sinyallerini göndermektedir. SDGM tarafından alınan bu sinyaller uygun şekilde işlenerek anahtarlama elemanlarına işaret göndermektedir. Böylece yük üzerindeki gerilimin 220 V, 50 Hz değerlerinde olması sağlanmaktadır ve yük üzerinde reaktif güç kontrolü yapılmaktadır.

2.3.1. Üç Çevrimli Hata Toplayıcı

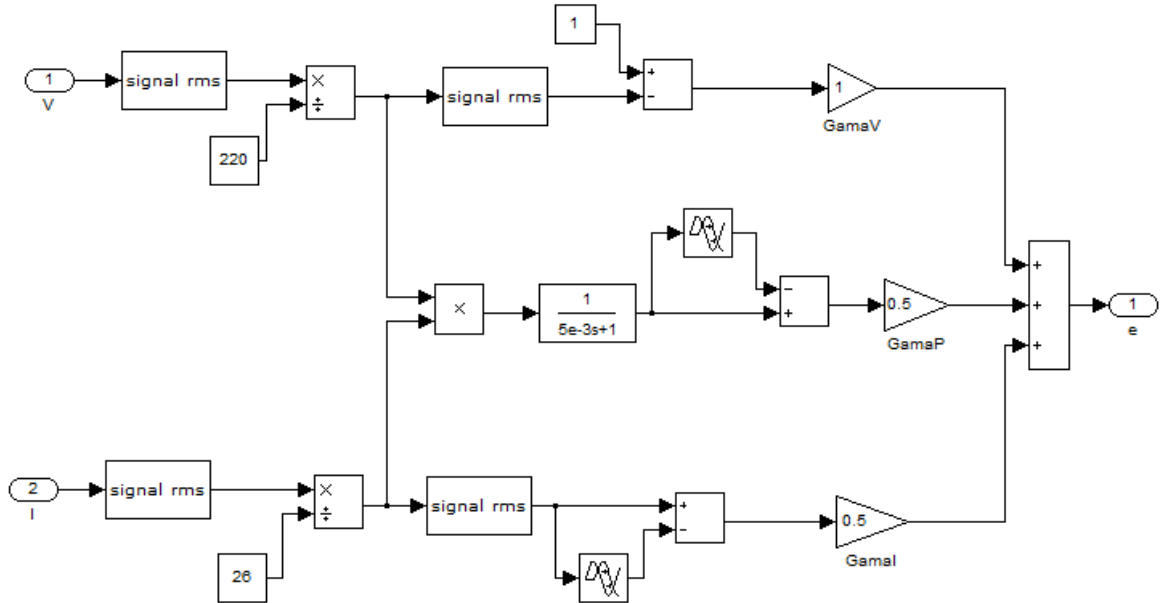
Gerilim akım ve güç hatalarının toplamı ile hata işareti üretilmektedir. Girilen referans akım ve gerilim değerlerine göre hata işaretleri üretilmektedir. Sistemin ana yapısı Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Üç çevrimli hata toplayıcı

Sistemin B3 barasından alınan gerilim değeri, referans gerilim değerine (taban değere) bölünerek birim değere (pu) dönüştürülür. Daha sonra bu değerinin etkin değeri alınır. Bu etkin değeri alınan işaret 1 pu değeri ile kıyaslanır. Elde edilen değer gerilim katsayısı ile çarpılır. Buradan çıkan gerilim hata değeri toplanmak üzere toplama noktasına gönderilir. Benzer şekilde akım değeri de B3 barasından alınıp referans değere bölünür ve etkin değeri alınır. Bu etkin değer 5 ms'lik bir gecikme ile bir önceki değeri ile kıyaslanır. Etkin değerlerin bir önceki değeri ile bir sonraki değeri arasındaki fark alınır. Daha sonra bu fark bir akım katsayısı ile çarpılır. Buradan çıkan akım hatası da yine toplanmak üzere toplama noktasına gönderilir. Akım ve gerilim değerleri taban değerlere bölünerek güç elde edilmek üzere çarpım noktasına gönderilir. Burada bu değerler çarpılarak güç değeri elde edilir. Daha sonra bir alçak filtreden geçirilir. Gücün bir önceki değeri ile bir sonraki değeri arasındaki fark alınarak kıyaslama yapılır. Buradan da yine bir güç kuvvetlendirme katsayısı ile çarpılır. Bu çevrimden çıkan güç hata değeri de yine toplanmak üzere toplama noktasına gönderilir. Bu toplama noktasına gönderilen akım, gerilim ve güç hata değerleri toplanarak toplam hata değeri elde edilir. Bu hata değerinin sıfır değerinde ya da sıfıra yakın bir değerde olması amaçlanmaktadır. Buradan elde edilen hata değeri de denetleyicinin giriş değeridir [40 - 41].

Üç çevrimli hata toplayıcının simülasyon modeli Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.8. Üç çevrimli hata toplayıcının Matlab/Simulink modeli

2.3.2. Denetleyiciler

2.3.2.1. PI Denetleyici

Sistemde PI türü denetleyici kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Tablo 3'deki gibidir.

Tablo 3. PI parametreleri

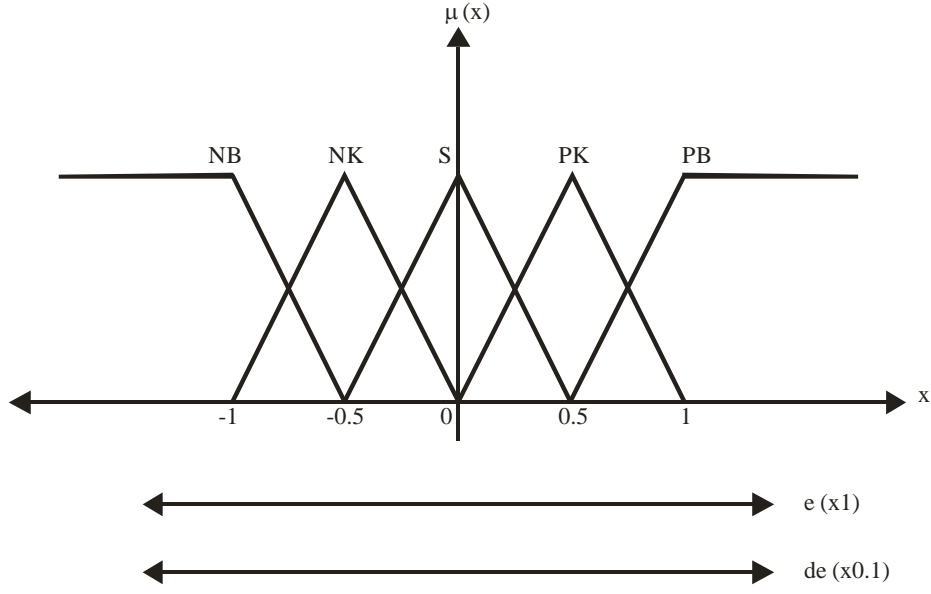
P	$k_p=0,5$
I	$k_i=0,3$

2.3.2.2. Bulanık Mantık Denetleyici

Bulanık mantık denetleyicinin içyapısı Matlab/Simulink ortamında [31] numaralı kaynaktan modifiye edilmiştir. Genellikle BMD'nin giriş değişkenleri kontrol hatası (e) ve bu hatanın bir örnekleme süresindeki değişimi (de) şeklindedir. Bu değişkenlere göre BMD'nin kural tabanı ünitesinde bir kural tablosu oluşturulur. Oluşturulan bu kural tablosu Tablo 4'de gösterilmiştir. Şekil 2.9'da ise girilen kesin değerlerin bulanıklaştırma işleminde kullanılan üçgen üyelik fonksiyonlarının şekli görülmektedir.

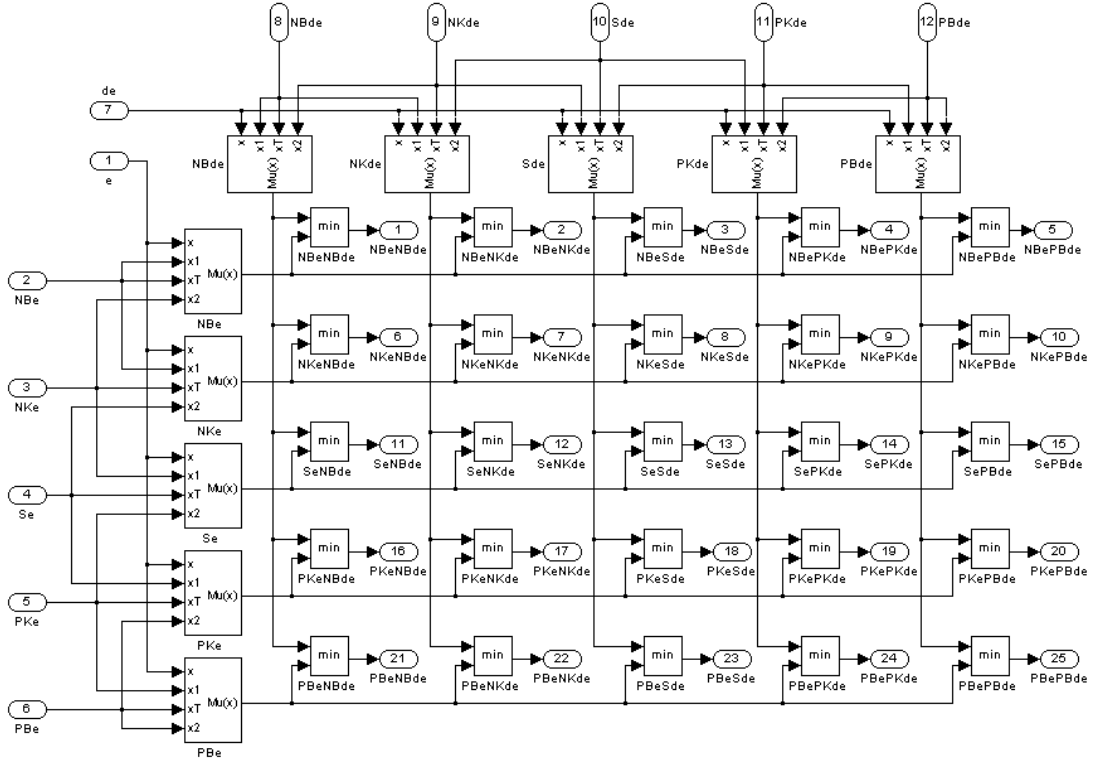
Tablo 4. Kural tablosu

de \ e	NB (Negatif Büyük)	NK (Negatif Küçük)	S (Sıfır)	PK (Pozitif Küçük)	PB (Pozitif Büyük)
NB	NB	NB	NK	NK	S
NK	NB	NK	NK	S	PK
S	NK	NK	S	PK	PK
PK	NK	S	PK	PK	PB
PB	S	PK	PK	PB	PB



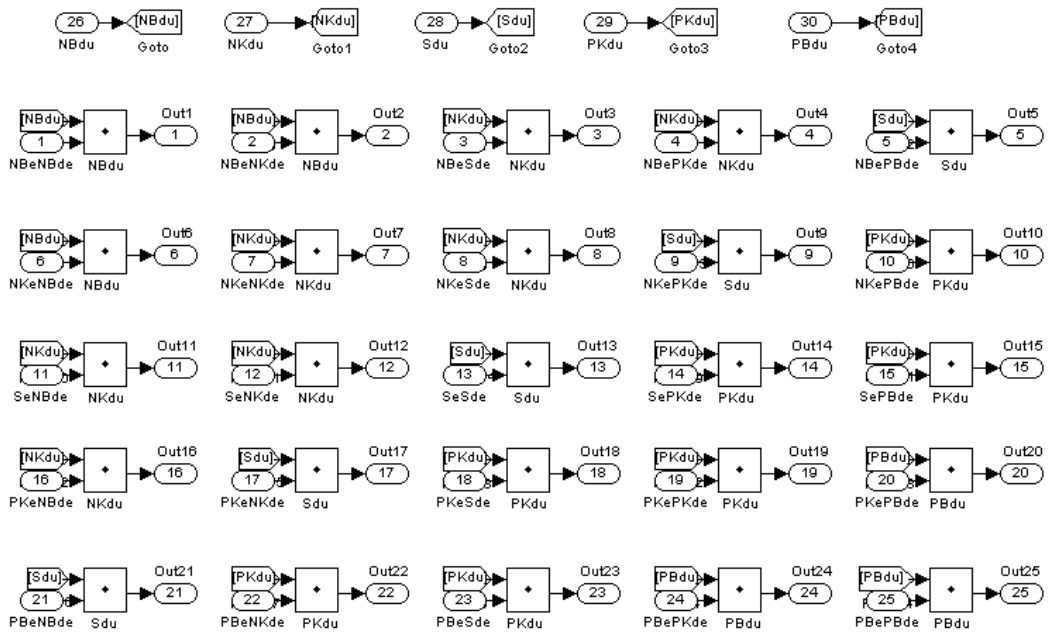
Şekil 2.9. Kullanılan üçgen üyelik fonksiyonları

BMD'nin bulanıklaştırma işleminin simulink modeli Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Giriş uzayından gelen üyelik değerlerinin minimumları alınarak her kural için gerekli ağırlık katsayıları belirlenir.



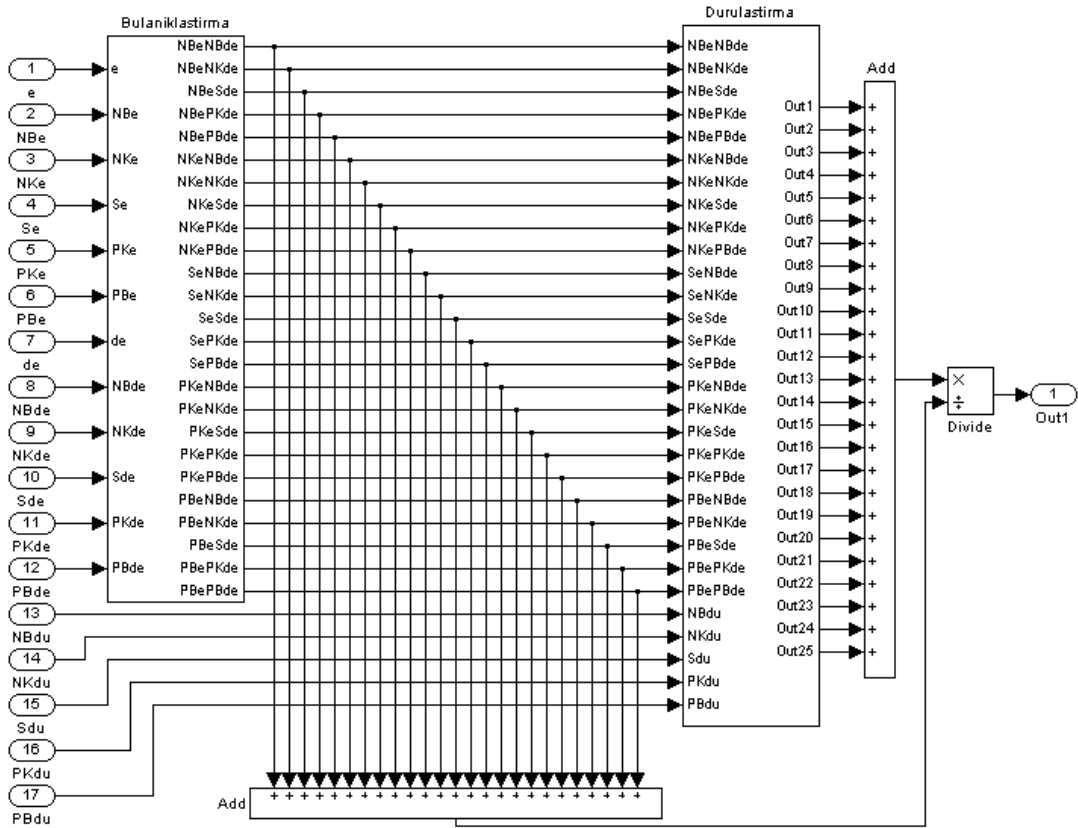
Şekil 2.10. Bulanıklaştırma işleminin simulink modeli

Gerekli ağırlık katsayıları bulanıklaştırma ünitesinde belirlendikten sonra bu değerler çarpılmak üzere kuralların işlendiği kısma gönderilir. Bu yapı Şekil 2.11’de görülmektedir.

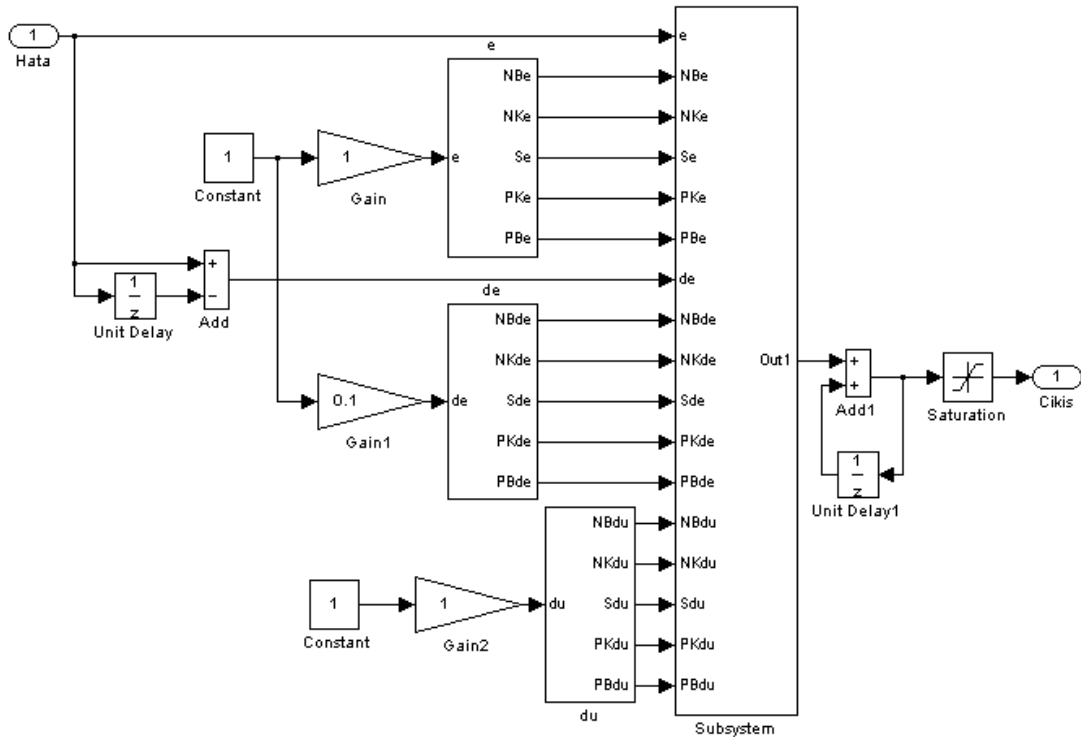


Şekil 2.11. Kuralların işlendiği kısım

Durulaştırma ünitesi ise Şekil 2.12’de görüldüğü gibidir. Durulaştırma ünitesinde ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak kesin değerler elde edilir. Bu kesin değerler denetleyicinin çıkışıdır.



Şekil 2.12. Durulaştırma işleminin simulink modeli



Şekil 2.13. Giriş ve çıkış değişkenleri ile BMD

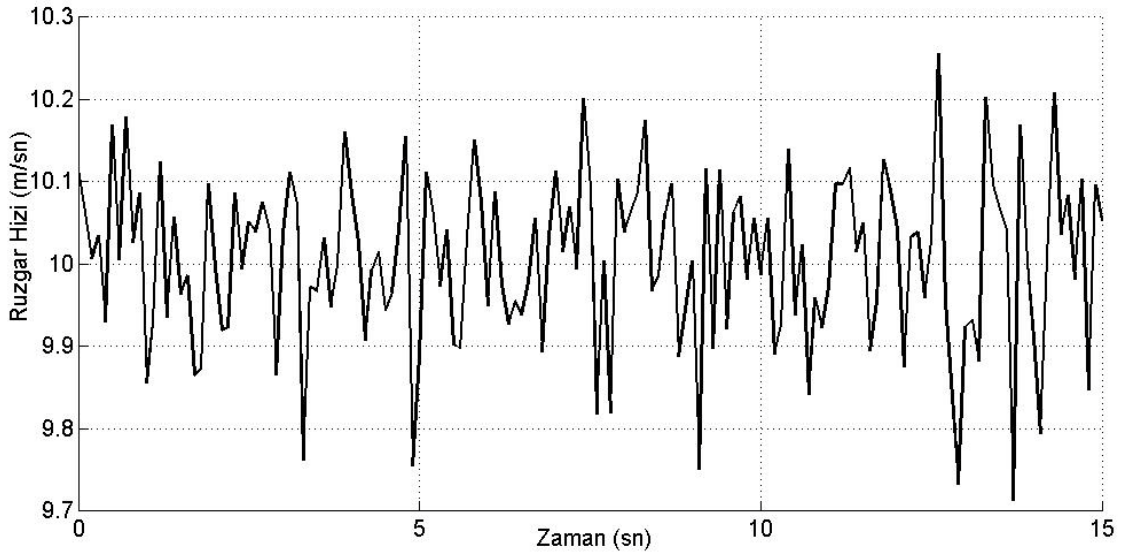
Şekil 2.13’de bulanık denetleyicinin giriş büyüklükleri ve kapalı blok diyagramı verilmektedir. Burada toplam hata ve bu hatadaki değişimden yola çıkılarak denetleme işlemi yapılmaktadır. Referans gerilim girişi bulanık üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı kesin uzayın alt ve üst sınırlarını belirlemek üzere BMD bloğu içerisinde kullanılmaktadır. Bunun dışında toplam hata ve hatadaki değişim BMD’nin temelde iki kesin girişleridir. BMD’nin çıkışı ise kontrol işaretindeki değişimi vermektedir. Bu değişim bir önceki örneklemede kullanılan denetim işaretine eklenerek yeni denetim işareti elde edilmektedir. Yapılan bu son işlemle BMD’nin etkisi bir integral alıcının etkisine benzetilmiştir.

2.4. Sistemde Kullanılan Yükler

Sistemde yük olarak, 7kW – 2kVAr değerinde bir adet RL yükü, 2kW değerinde bir adet motor yükü ve 500W-500VAr değerinde bir adet doğrusal olmayan yük kullanılmıştır.

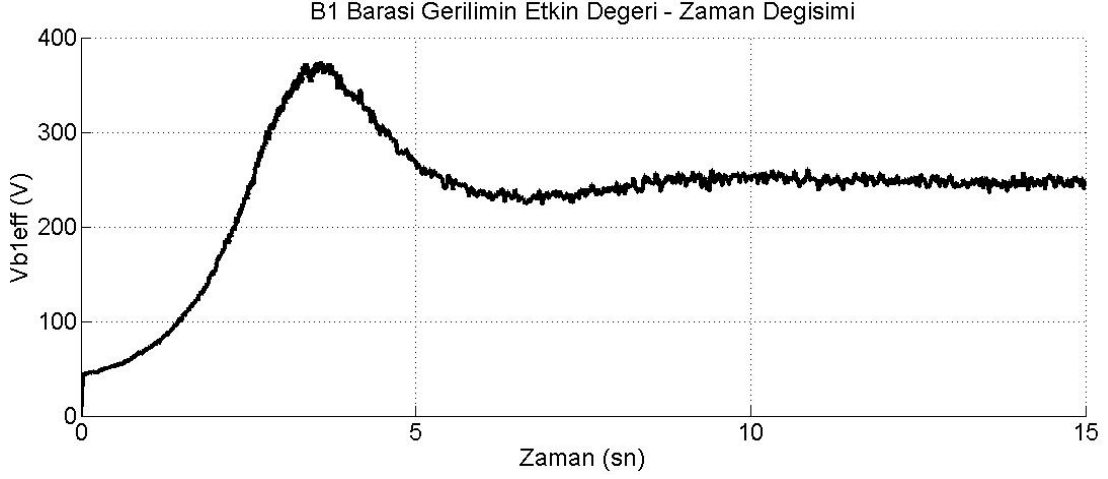
3. BULGULAR

Sistem Şekil 3.1’de görüldüğü gibi değişken rüzgar hızında, 7kW – 2kVAr’lık bir RL yükü, 500W-500VAr’lık bir lineer olmayan yük ve 2kW’lık bir motor yükü ile beslenirken PI denetleyicili benzetim sonuçları Şekil 3.2 ile Şekil 3.11 arasında görülmektedir.



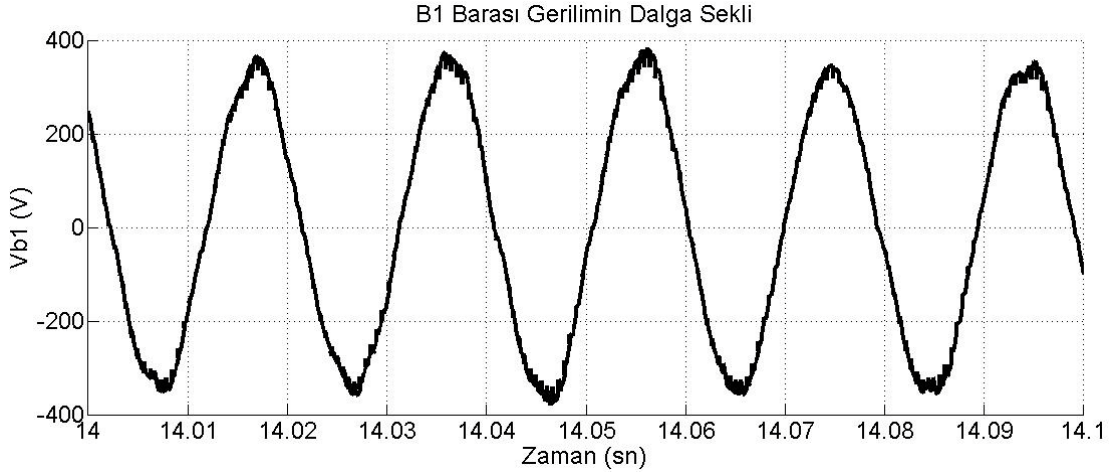
Şekil 3.1. Rüzgar hızı değişimi

Şekil 3.1’de 15 sn’lik benzetim zamanı boyunca rüzgar hızının 10,3m/sn ile 9,7m/sn aralığında rastgele değiştiği varsayılmaktadır. PI denetleyici ile denetlenen sistemde B1 barasına ait gerilimin etkin değerinin değişimi Şekil 3.2’de görülmektedir. Burada sistem sürekli duruma 9. sn’de ulaşmaktadır. Gerilim değeri ise 240V ile 260V arasında değişmektedir.



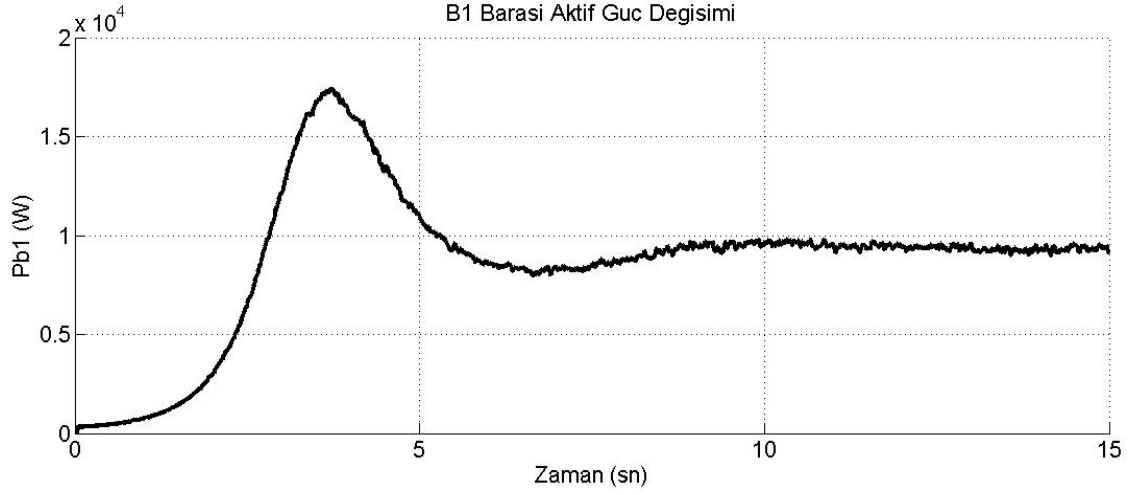
Şekil 3.2. PI denetleyicili benzetimde B1 barası geriliminin etkin değeri

B1 barasındaki gerilimin dalga şekli ise Şekil 3.3’de görülmektedir. Sürekli durumda dalga şekli sinüse oldukça yakındır. Fakat bir miktar harmonik içermektedir.

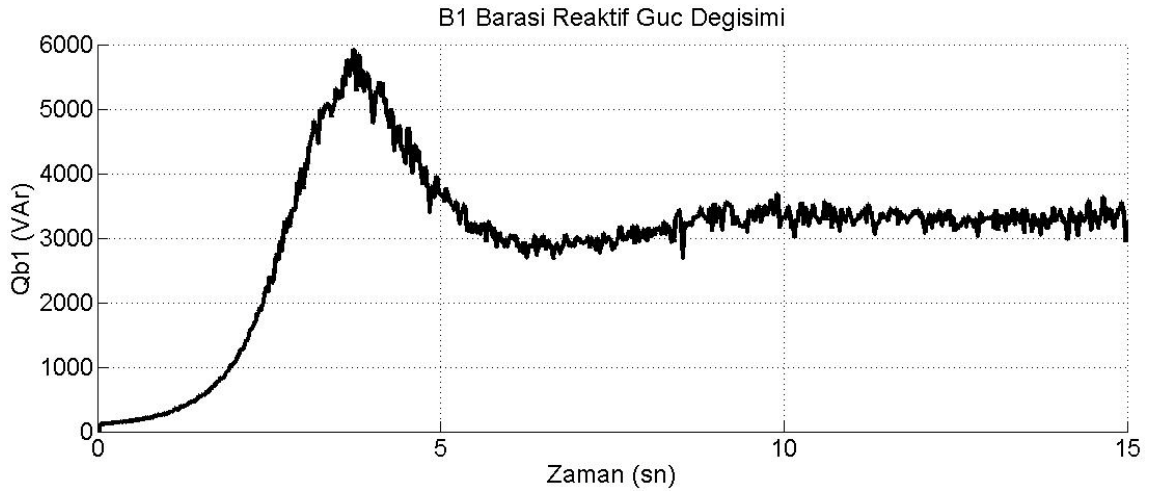


Şekil 3.3. PI denetleyicili benzetimde B1 barası geriliminin dalga şekli

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de B1 barasına ait aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir. Rüzgar türbininin gücü 10kW’dır. Sistem tam güce yakın bir güç vermektedir. Bu esnada sistemde yaklaşık olarak 3,5kVAr’lık bir reaktif güç bulunmaktadır.

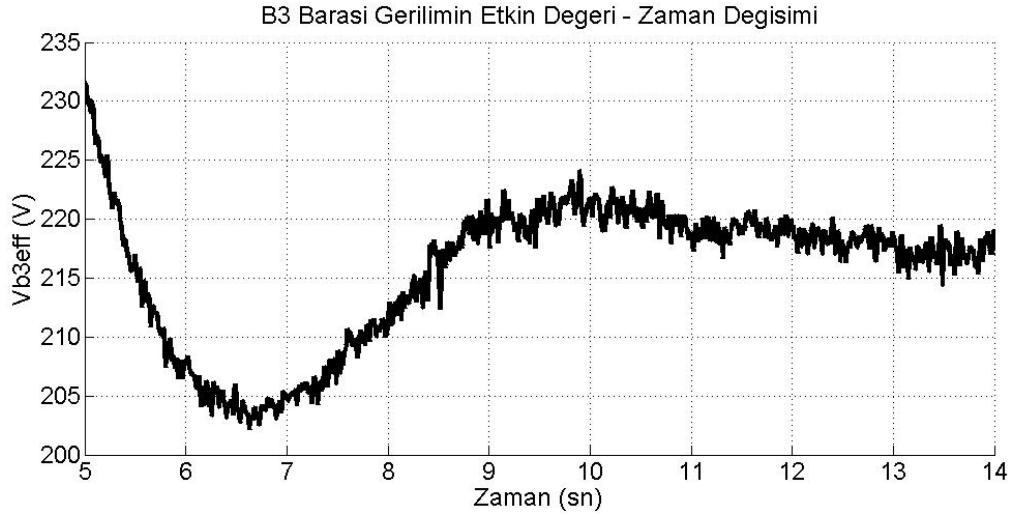


Şekil 3.4. PI denetleyicili benzetimde B1 barasındaki aktif gücün değişimi

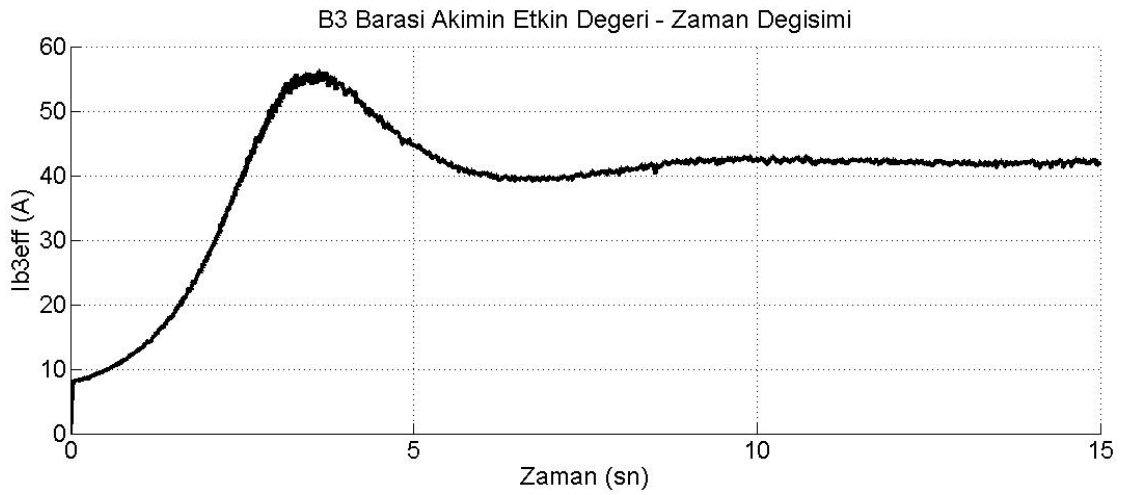


Şekil 3.5. PI denetleyicili benzetimde B1 barasındaki reaktif gücün değişimi

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de B3 barasına ait gerilim ve akımın etkin değerlerinin değişimi görülmektedir. Aynı zamanda B3 barası yük barasıdır ve burada gerilimin etkin değerinin PI denetleyici ile 220V olması istenmektedir. Şekil 3.6’da bu değer 215V ile 225V arasında değişmektedir. Gerilim değeri 9.sn’de 220V değerine ulaşmaktadır fakat 220V değerinde sabit kalamamaktadır. Benzer şekilde akım değeri de 42A civarındadır.

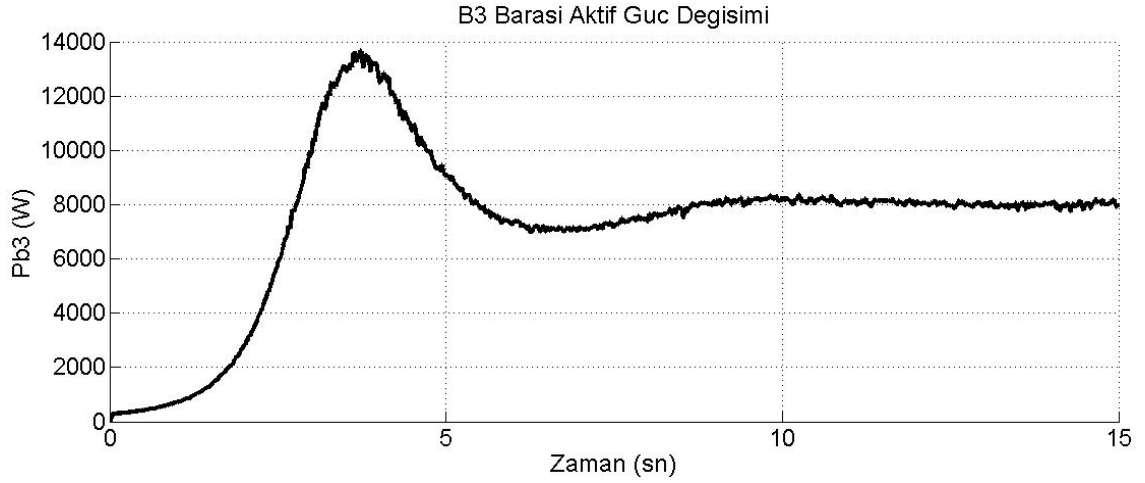


Şekil 3.6. PI denetleyicili benzetimde B3 barası geriliminin etkin değeri

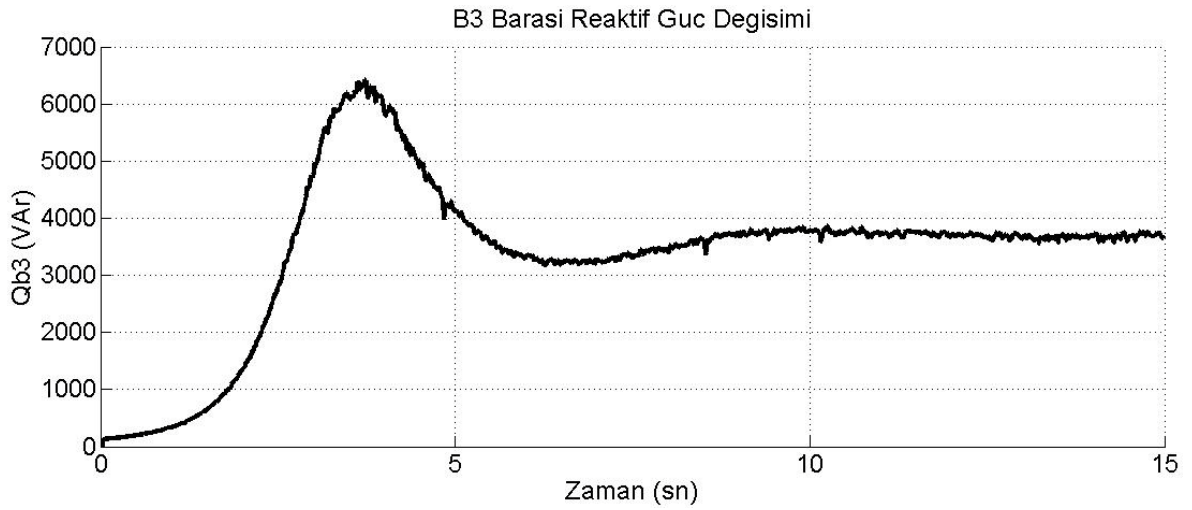


Şekil 3.7. PI denetleyicili benzetimde B3 barası akımının etkin değeri

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da B3 barası, yani yük barasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir. Sürekli durumda yük tarafından çekilen net aktif güç 8kW olurken reaktif güç değeri ise 3,8kVAr'dir.

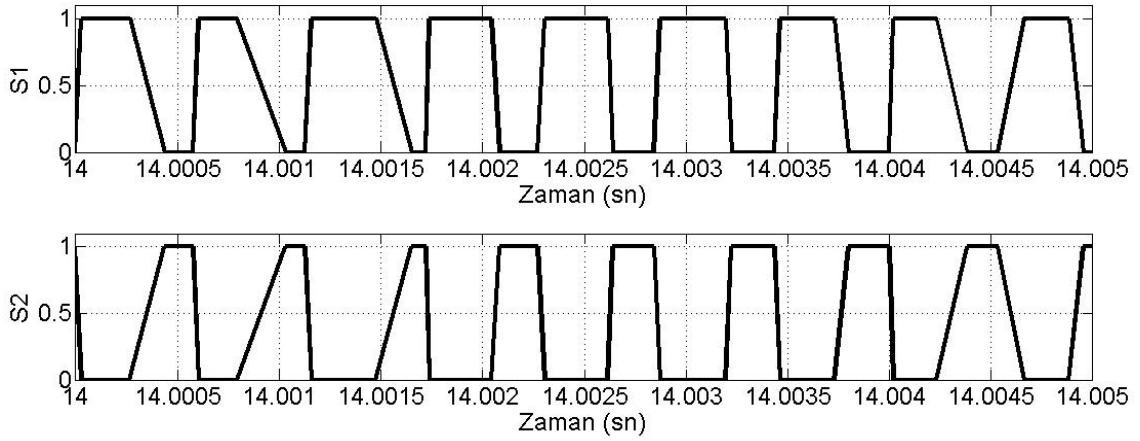


Şekil 3.8. PI denetleyicili benzetimde Yük tarafında çekilen aktif güç



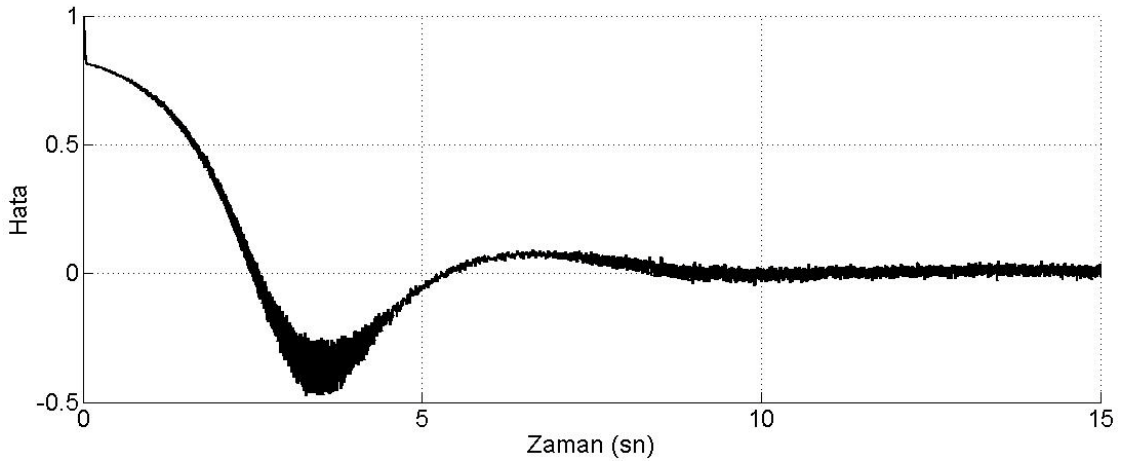
Şekil 3.9. PI denetleyicili benzetimde Yük tarafında reaktif güç durumu

Şekil 3.10'da DVR/AGF bloğunda bulunan SDGM'nin, anahtarların 14.sn ve 14,005sn aralığında durumu görülmektedir. Bir anahtar kapalı iken diğeri açık durumdadır ve sistemde filtre kondansatörleri ya devrede yada devre dışında kalmaktadır.



Şekil 3.10. PI denetleyicili benzetimde DVR/AGF bloğunda anahtarlama

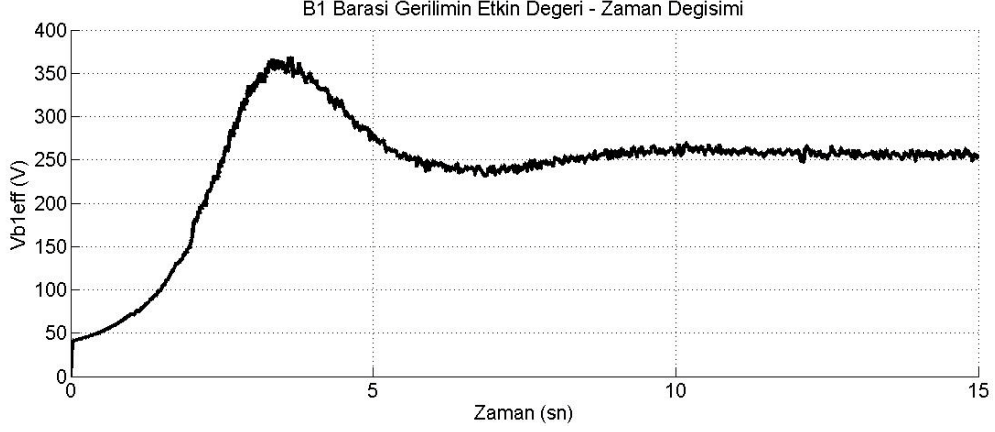
Şekil 3.11’de PI türü denetleye ait hata değişimi görülmektedir. Hata değeri sıfır civarında değişmektedir.



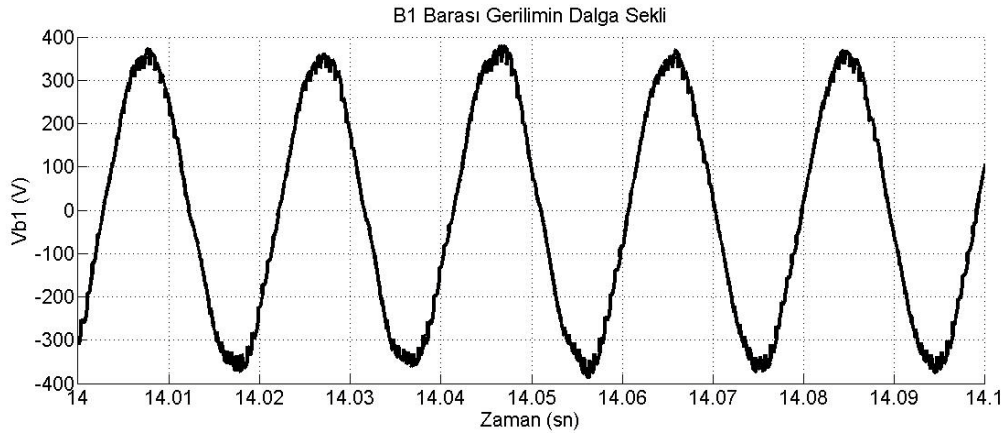
Şekil 3.11. PI denetleyici hata değişimi

Şekil 3.12 ile Şekil 3.21 arasında BMD’li sistemin sonuçları görülmektedir. Benzer şekilde PI denetleyicide olduğu gibi 15 sn’lik benzetim zamanı boyunca rüzgar hızının 10,3m/sn ile 9,7m/sn aralığında rastgele değiştiği varsayılmaktadır. BMD ile denetlenen sistemde B1 barasına ait gerilimin etkin değerinin değişimi Şekil 3.12’de görülmektedir. Burada sistem sürekli duruma 9.sn’de ulaşmaktadır. Gerilim değeri ise 240V ile 260V

arasında değişmektedir. Şekil 3.13’de ise B1 barasındaki gerilimin dalga şekli görülmektedir. Sistem sürekli duruma geldikten sonra elde edilen grafikdir. 14 ile 14,1.sn aralığında açılarak çizdirilmiştir.

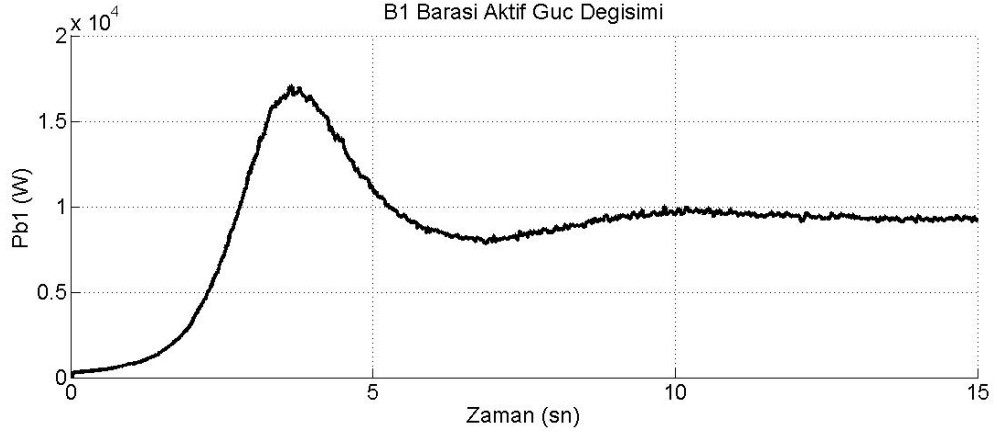


Şekil 3.12. BMD’li benzetimde B1 barası geriliminin etkin değeri

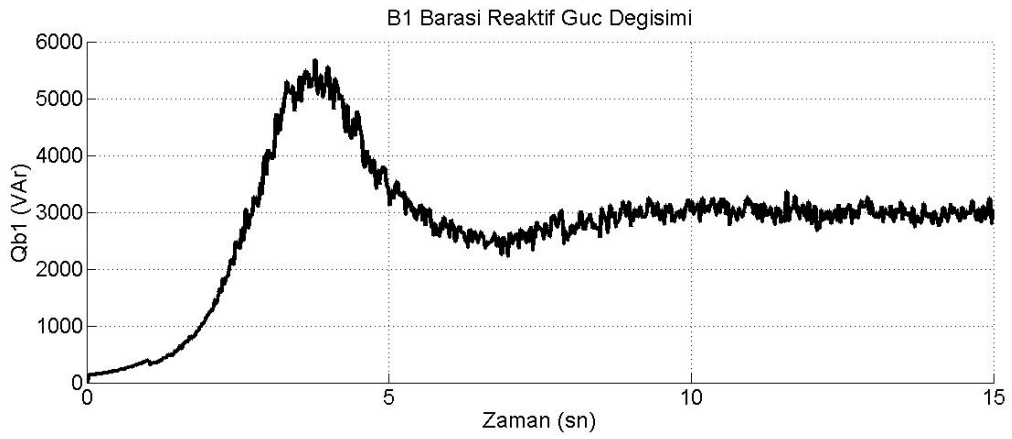


Şekil 3.13. BMD’li benzetimde B1 barası gerilimin dalga şekli

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de B1 barasına ait aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir. Sürekli durumda rüzgar türbininden elde güç 9,8kW’dır. Sistem tam güce yakın bir güç vermektedir. Bu esnada sistemde yaklaşık olarak 3kVAr’lık bir reaktif güç bulunmaktadır.

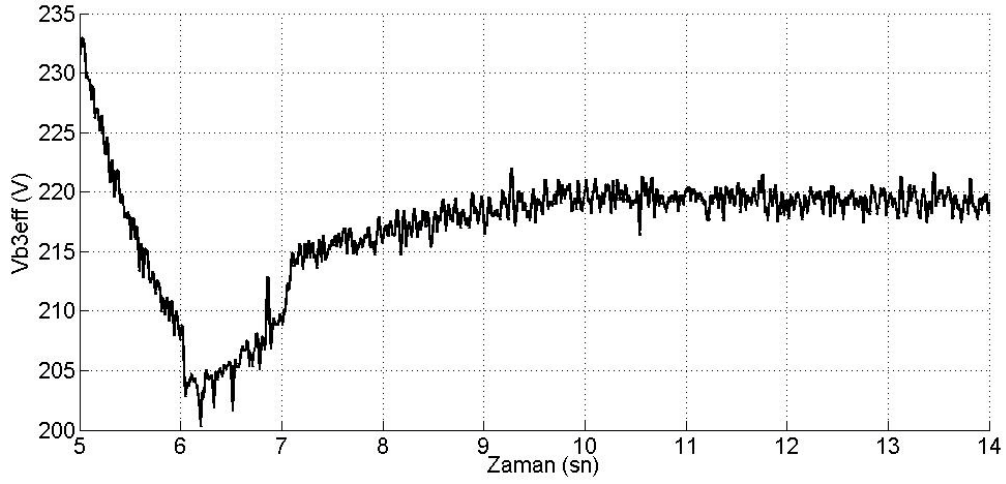


Şekil 3.14. BMD'li benzetimde B1 barasındaki aktif gücün değişimi

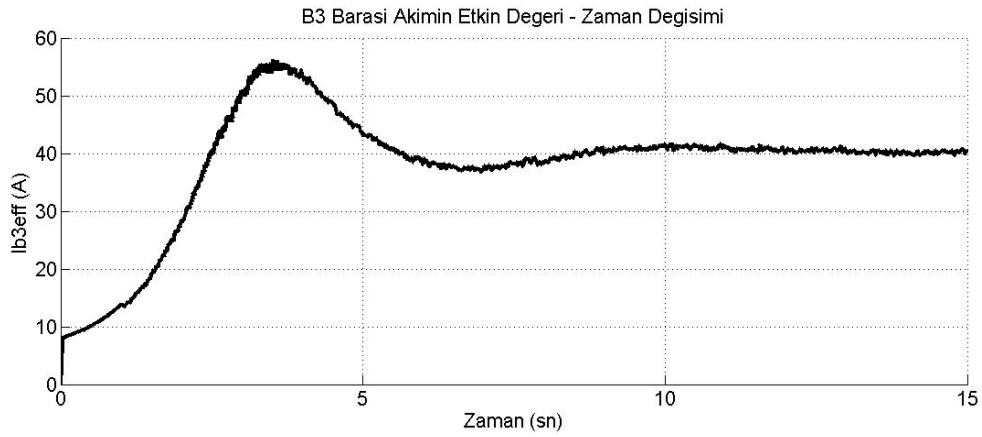


Şekil 3.15. BMD'li benzetimde B1 barasındaki reaktif gücün değişimi

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de B3 barasına ait gerilim ve akımın etkin değerlerinin değişimi görülmektedir. Aynı zamanda B3 barası yük barasıdır ve burada gerilimin etkin değerinin BMD ile 220V olması istenmektedir. Şekil 3.16'da bu değer 9.sn'de 220V değerine ulaşmaktadır ve bu değerinde sabit kalmaktadır. Benzer şekilde akım değeri de 40A civarındadır.

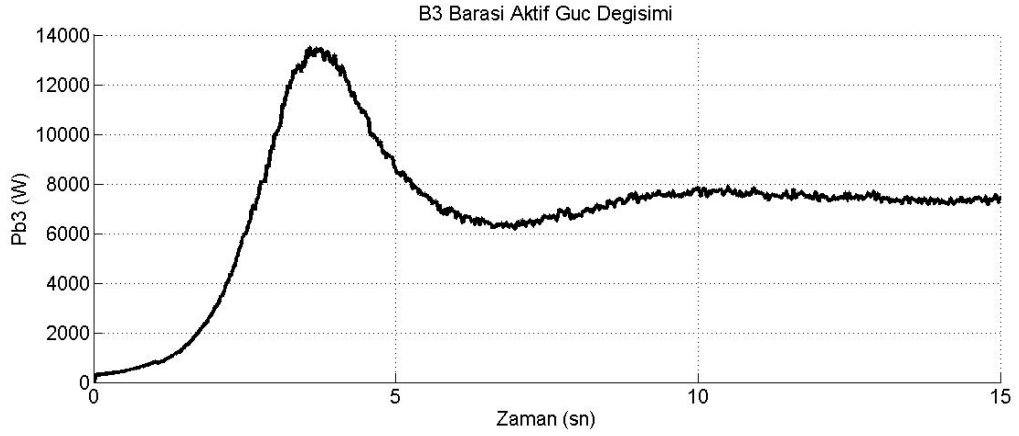


Şekil 3.16. BMD'li benzetimde B3 barası geriliminin etkin değeri

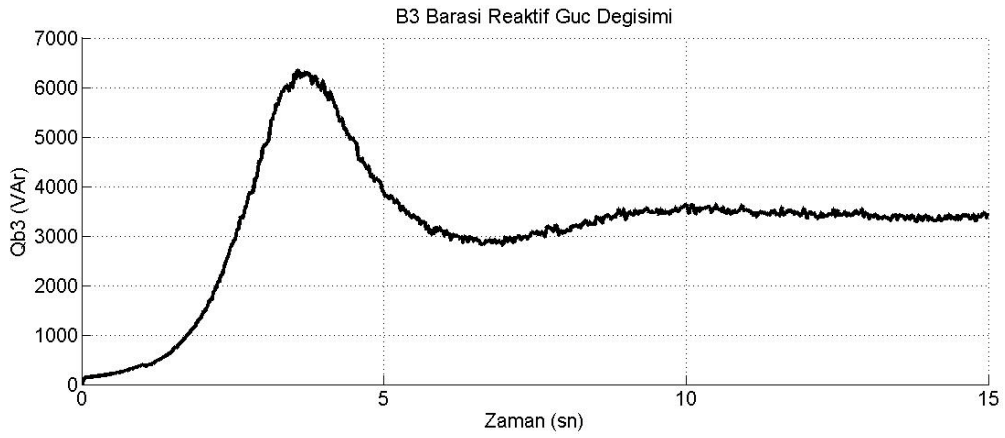


Şekil 3.17. BMD'li benzetimde B3 barası akımının etkin değeri

Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da B3 barası, yani yük barasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir. Sürekli durumda yük tarafından çekilen net aktif güç 7,5kW olurken reaktif güç değeri ise 3,4kVAr'dir.

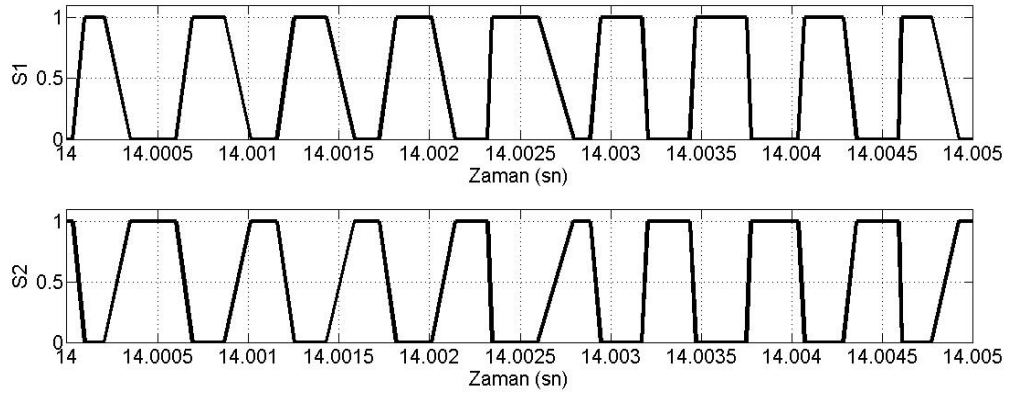


Şekil 3.18. BMD'li benzetimde Yük tarafında çekilen aktif güç



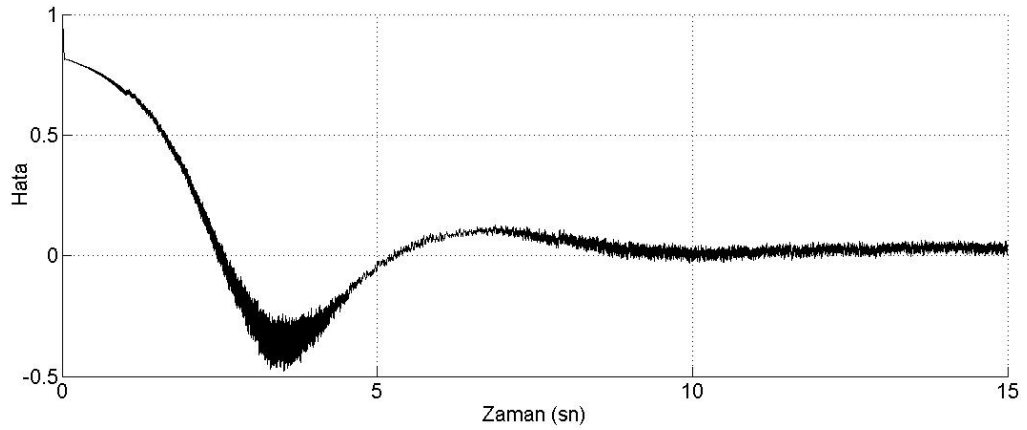
Şekil 3.19. BMD'li benzetimde Yük tarafında reaktif güç durumu

Şekil 3.20'da DVR/AGF bloğunda bulunan SDGM'nin, anahtarların 14.sn ve 14,005sn aralığında durumu görülmektedir. Bir anahtar kapalı iken diğeri açık durumdadır ve sistemde filtre kondansatörleri ya devrede ya da devre dışında kalmaktadır.



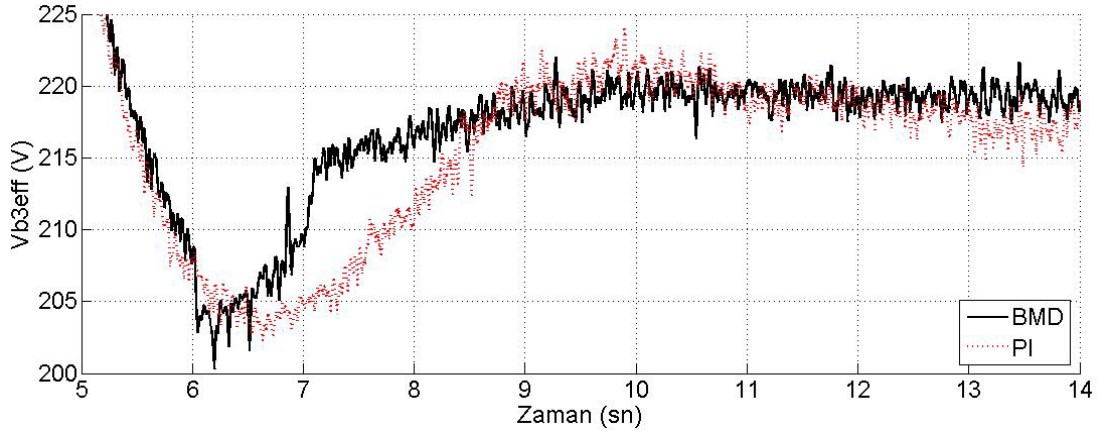
Şekil 3.20. BMD'li benzetimde DVR/AGF bloğunda anahtarlama

Şekil 3.21'de BMD'ye ait hata değişimi görülmektedir. Hata değeri sıfır civarında dolaşmaktadır.



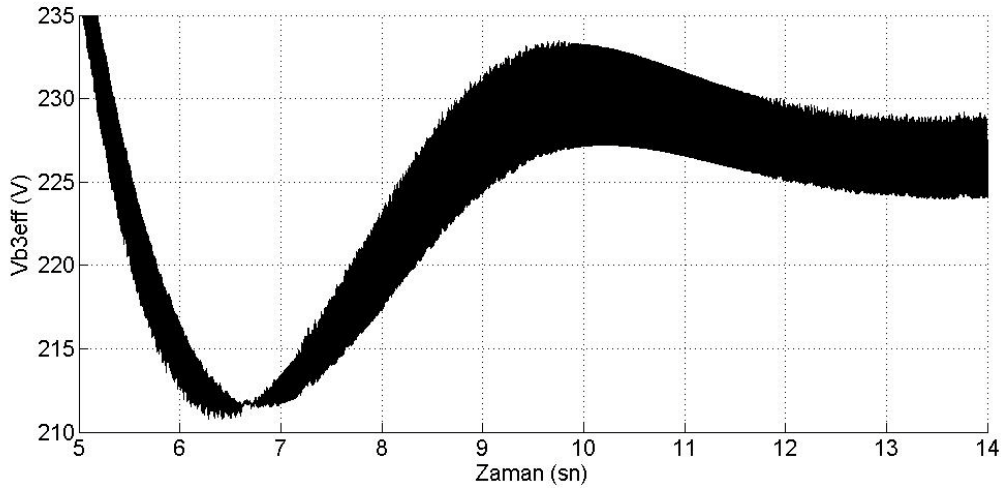
Şekil 3.21. BMD hata değişimi

Şekil 3.22'de rüzgar hızının 10m/sn de sabit tutulduğu durumda, hem PI hemde BMD'li sistemde yük üzerindeki gerilimin etkin değerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 3.22. PI ve BMD ile B3 barasının etkin değerinin değişimi

Son olarak sistemde DVR/AGF bloğu yokken yapılan benzetim sonucu yük üzerindeki gerilimin efektif değeri Şekil 3.23'de görülmektedir. Bu gerilim değerinin 13. sn'de sürekli rejime ulaştığı ve 228V civarında kaldığı görülmektedir.



Şekil 3.23. Sistemde DVR/AGF bloğu yokken B3 barası geriliminin etkin değeri

4. TARTIŞMA

Sistemde, yükün 7kW – 2kVAr'lık bir RL yükü, 500W-500VAr'lık lineer olmayan bir yük ve 2kW'lık bir motor yükü olduğu durumda DVR/AGF bloğu sistemde yok iken yani kontrolsüz olarak benzetimi yapıldığında yükler üzerinde gerilimin istenilen değer olan 220V değerinde sabit kalamadığı görülmektedir.

Sistemde, 7kW – 2kVAr'lık bir RL yükü, 500W-500VAr'lık lineer olmayan bir yük ve 2kW'lık bir motor yükü olduğu durumda DVR/AGF bloğu ile PI denetleyici ile kontrol yapılırken yükler üzerindeki gerilimin maksimum aşma değeri 300V değerini bulmaktadır. Bu değer BMD'li sistemde 305V'tur. Ayrıca her iki denetleyicinin de sürekli duruma oturma zamanları dikkate alındığında; PI türü denetleyicinin 220V değerine oturmazken, BMD'li sistemde 9. sn'de 220V değerine ulaşarak sabit kalmaktadır. Dolayısıyla BMD türü denetleyici bu değerler kıyaslandığında PI denetleyiciye göre daha iyi çalışmaktadır.

Sistemde gerilim düzenlemesi yapılırken aynı zamanda kompanzasyon da yapılmaktadır. 7kW – 2kVAr'lık bir RL yükü, 500W-500VAr'lık lineer olmayan bir yük ve 2kW'lık bir motor yükü olduğu durumda DVR/AGF bloğu sistemde yok iken yükler üzerindeki reaktif güç değeri 4500VAr değerlerindedir. DVG/AGF bloğu sistemde iken yükler üzerindeki reaktif güç değeri 3000VAr değerlerine kadar düşürülmüştür.

5. SONUÇLAR

Benzetim çalışması yapılan sistemde rüzgar türbininden enerji elde etme konusu üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada üç fazlı asenkron generatör ile tek fazlı yükler beslenmektedir. Üretilen enerjinin tek fazlı doğrusal olmayan yüklere aktarılması sırasında enerjinin temiz ve gerilimin istenilen düzeyde olması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen üç çevrimli hata toplayıcı ve DVR/AGF tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik ile yük üzerindeki gerilimin sabit kalması sağlanmaktadır.

Bulanık mantık denetleyicilerin PI türü denetleyiciler ile kıyaslandığında BMD'nin insanların tecrübelerine dayanan bir sistem olması ve doğrusal olmayan sistemlerde hesap yapmanın zorluğu nedeniyle böylesi karmaşık sistemlerde kullanıldıklarında daha iyi sonuçlar verebildikleri görülmektedir. Özellikle çok hızlı çalışmayan sistemlerde BMD türü denetleyicileri daha iyi performans gösterdikleri görülmektedir. Burada PI ya da BMD türü denetleyiciler arasında tercih yapmak gerektiğinde BMD bir adım öne geçmektedir. Bunun yanında BMD'lerin yapı bakımından PI türü denetleyicilere göre daha karmaşık olmaları ve daha pahalı olmaları nedeniyle tamamen işlev ve fiyat parametreleri dikkate alınarak seçilmeleri gerekmektedir.

Sistemde kullanılan BMD 5 kurallıdır. Sistem 3 ve 7 kurallı BMD kullanarak da denenmiştir. 3 kurallının istenen performansı veremediği 7 kurallının ise sistemi daha da yavaşlattığı gözlenmiştir ve performansı da 5 kurallı ile aynıdır.

Sistemde yapılan kompanzasyon hemen hemen reaktif gücü istenilen düzeylere getirmiştir. Rüzgar hızı değişken ve yük olarak 7kW - 2kVAr'lık RL yükü, 1kW'lık bir lineer olmayan yük ve 2kW'lık motor yükü kullanıldığı durumda sistemin güç faktörü 0.90 olarak hesaplanmaktadır. Bu değer Türk standartlarına uygun bir değerdir. Bu nedenle oldukça iyi bir kompanzasyon yapılmaktadır.

6. ÖNERİLER

Bu çalışmada BMD türü ve PI türü denetleyiciler kullanılarak sistem performansı incelenmektedir. Çıkış gerilimini istenilen düzeyde tutmak ve kaliteli enerji elde edebilmek için daha farklı kontrol yöntemleri de kullanılabilir. Özellikle bulanık mantığa ilave olarak sinirsel bulanık kontrol tekniği de kullanılabilir. Bunun dışında öngörülü kontrol ya da genetik algoritmalar kullanılarak sistem denetlenebilir.

Yük üzerindeki reaktif gücün azaltılması yani sistemde daha iyi bir kompanzasyon yapılması ile daha temiz bir enerji elde edilebilir. Burada statik kompanzasyon tekniği uygulanabileceği gibi farklı dinamik kompanzasyon da yapılabilir. Böylece güç faktörü 1'e daha da yaklaştırılabilir.

THD değerlerinin standartlara uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için de değişik filtre yöntemleri denenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Fukami, T., Imamura, M., Kaburaki, Y. and Miyamoto, T., A New Self-Regulated Self-Excited Single-phase Induction Generator Using a Squirrel Cage Three-phase Induction Machine, International Conference on Energy Management of Power Delivery, 1995, Vol. 1, Pages:308-312.
2. Fukami, T., Kaburaki, Y., Kawahara, S. and Miyamoto, T., Performance Analysis of a Self-Regulated Self-Excited Single-phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine, IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 1997, Milwaukee, WI, USA, TD2/3.1 – TD2/3.3.
3. Fukami, T., Kaburaki, Y., Kawahara, S. and Miyamoto, T., Performance Analysis of a Self-Regulated Self-Excited Single-phase Induction Generator Using a Three-phase Machine, IEEE Transactions on Energy Conversion, September 1999, Vol. 14, No. 3.
4. Mahato, S., N., Sharma, M., P. and Singh, S., P., Analysis of Transient Behavior of a Single-Phase self-regulated self-excited induction generator using a three-phase machine, IEEE International Conference on Industrial Technology, December 2006, Mumbai, 2709 – 2714.
5. Mahato, S., N., Sharma, M., P. and Singh, S., P., Determination of Minimum and Maximum Capacitances of a Self-Regulated Self-Excited Single-Phase induction generator Using a Three-phase winding, India International Conference on Power Electronics, December 2006, Chennai, 28 – 33.
6. Mahato, S., N., Sharma, M., P. and Singh, S., P., Transient Analysis of a Single-Phase Self-Excited Induction Generator using a Three-Phase Machine feeding Dynamic Load, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006, Pages:1-6.
7. Mahato, S., N., Sharma, M., P. and Singh, S., P., Transient performance of a single-phase self-regulated self-excited induction generator using a three-phase machine, Electric Power Systems Research, 77 (2007) 839-850.
8. Mahato, S., N., Singh, S., P. and Sharma, M., P., Capacitors Required for Maximum Power of a Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2008, 23, 2, 372 – 381.
9. Shilpakar, L., B. and Singh, B., Dynamic behavior of a three-phase self-excited induction generator for single-phase power generation, Electric Power Systems Research, 48,1 (1998) 37-44.
10. Singh, B., Shilpakar, L., B., Murthy, S., S. And Tiwari, A., K., Improved Steady State and Transient Performance With Optimum Excitation of Single-Phase Self-Excited Induction Generator, Electric Machines and Power Systems, 28 (2000) 591-604.

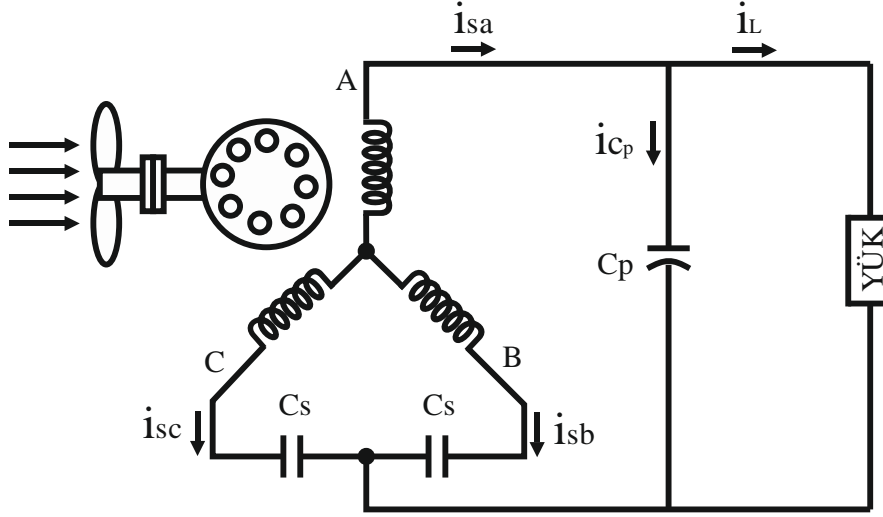
11. Chan, T., F. and Lai, L., L., Steady-State Analysis and Performance of a Single-Phase Self-Regulated Self-Excited Induction Generator, IEE Proc – Gener. Transm. Distrib., March 2002, Vol. 149, No. 2.
12. Saif, M., A., N. and Khan B., N., A Simplified Analysis of a Constant Voltage Single Phase Self-Excited Induction Generator, Electric Power Components and Systems,33 (2005) 103-112.
13. Sharaf, A., M. and Chalet, R., A low cost on-off modulated power filter for single phase motorized loads, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998, Vol. 2, Pages:862 – 865.
14. Aboul – Seoud, T. and Sharaf, A., M., A Novel Dynamic Voltage Regulator Compensation Scheme for a Standalone Village Electricity Wind Energy Conversion System, Canadian Conference on Electirical and Computer Engineering, 2009, Pages:117 – 121.
15. Sharaf, A., M., Wang, W. and Altas, I., H., A Novel Modulated Power Filter Compensator for Renewable Dispersed Wind Energy Interface, International Conference on Clean Electrical Power, May 2007, Capri, 549 – 555.
16. Sharaf, A., M., Aljankawey, A. and Altas, I., H., A Novel Voltage Stabilization Control Scheme for Stand-alone Wind Energy Conversion Systems, International Conference on Clean Electrical Power, May 2007, Capri, 514 – 519.
17. Pao, L., Y. and Johnson, K., E., A Tutorial on the Dynamics and Control of wind turbine and wind farms, American Control Conference, June 2009, St. Louis, MO, 2076 – 2089.
18. Aboul – Seoud, T. and Sharaf, A., M., A Dynamic Voltage Regulator compensation scheme for a grid connected village electricity hybrid wind tidal energy conversion scheme, Electrical Power Energy Conference, October 2009, Montreal, QC, 1 – 6.
19. Rabelo, B., Hofmann, W., Silva, J., L., Oliveira, R., G. and Silva, S., R., Reactive Power Control in Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines, Power Electronics Specialists Conference, June 2008, Rhodes, 106 – 112.
20. Ahmed, T., Nishida, K. and Nakaoka, M., Static VAR Compensator-Based Voltage Regulation Implementation of Single-Phase Self-Excited Induction Generator, 39th Industry Applications Conference Annual Meeting, October 2004, Vol. 3, 2069 – 2076.
21. Ackermann, T., Wind power in power systems, John Wily and Sons LTD, İngiltere, 2005.
22. Özaktürk, M., Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.

23. Güneş, İ. İ., Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü, Yüksek Lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2006.
24. Burton, T., Shape, D., Jenkins, N. ve Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Willey and Sons, İngiltere, 2001.
25. Walker, J. F. ve Jenkins, N., Wind Energy Technology, John Willey and Sons, İngiltere, 1997.
26. Sarıoğlu, M. K., Gökaşan, M. ve Boğosyan, S., Asenkron Makinalar ve Kontrolü, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
27. Kuo, B. C., Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayınları, 2005.
28. Ogata, K., Modern Control Engineering, 4th Edition, Prentice Hall, 2001.
29. Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, Information Control, 8, 1965, 338 – 353.
30. Altaş, İ. H., Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı, Otomasyon Dergisi, Temmuz 1999, 62, 80 – 85.
31. Altas, I., H. and Sharaf, A., M., “A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Environment”, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, Int. J. IT&IC no.4 vol.1, 2007.
32. Elmas, Ç., Bulanık Mantık Denetleyiciler (Kuram, Uygulama, Sinirsel Bulanık Mantık), Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, 2003.
33. Baykal, N. ve Beyan, T., Bulanık Mantık İlke ve Temelleri, Bıçaklar Kitabevi, İstanbul, 2004.
34. Baykal, N. ve Beyan, T., Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler, Bıçaklar Kitabevi, İstanbul, 2004.
35. Bose, K. B., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, USA, 2002.
36. Güven, A. F., PWM İşaretinin Mikroişlemci ile Üretilip Fırçasız DA Motoru Hız Denetimine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
37. Gülgün, R., Güç Elektronigi, 4. Baskı, YTÜ Basım-Yayın Merkezi, İstanbul, 1999.
38. Saadat, H., Power Systems Analysis, McGraw-Hill Primis Custom Publishing; 2 edition, July 2002.
39. Demirören, A. ve Zeynelgil, L., Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004.

- 40.** Sharaf, A., M. and El-Sayed, M., A., H., A Novel Hybrid Integrated Wind-PV Micro Co-generation Energy Scheme for Village Electricity, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 2009, Miami FL, 1244 – 1249.
- 41.** Sharaf, A., M., Aljankawey, A., S. and Altas I., H., Dynamic Voltage Stabilization of Stand-Alone Wind Energy Schemes, Electrical Power Conferences, October 2007, Montreal, Que, 14 – 19.

Ek 1.

3 faz sincap kafesli asenkron generatörün 1 faz çalıştırılması için bağlantı şeması Ek Şekil 1'de verilmektedir.



Ek Şekil 1. Sincap kafesli tek fazlı asenkron generatörün bağlantı şeması

Yıldız bağlı stator faz akımlarının simetrik bileşenleri

$$I_a = I_{1p} + I_{1n}$$

$$I_b = a^2 I_{1p} + a I_{1n}$$

$$I_c = a I_{1p} + a^2 I_{1n}$$

(E.1)

Stator sargı uç gerilimleri

$$V_{ab} = Z_e I_a - (-jX_{cs}) I_b$$

$$V_{bc} = -jX_{cs} I_b - (-jX_{cs}) I_c$$

$$V_{ca} = -jX_{cs} I_c - Z_e I_a$$

(E.2)

Bu gerilimlerin pozitif ve negatif dizi bileşenleri

$$V_{1p} = \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca})$$

$$V_{1n} = \frac{1}{3}(V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca})$$

(E.3)

Generatör empedansının pozitif ve negatif bileşenlerini yukarıdaki denklemlerde yerine yazarsak

$$V_{1p} = -(1 - a^2)Z_{gp}I_{1p}$$

$$V_{1n} = -(1 - a)Z_{gn}I_{1n}$$

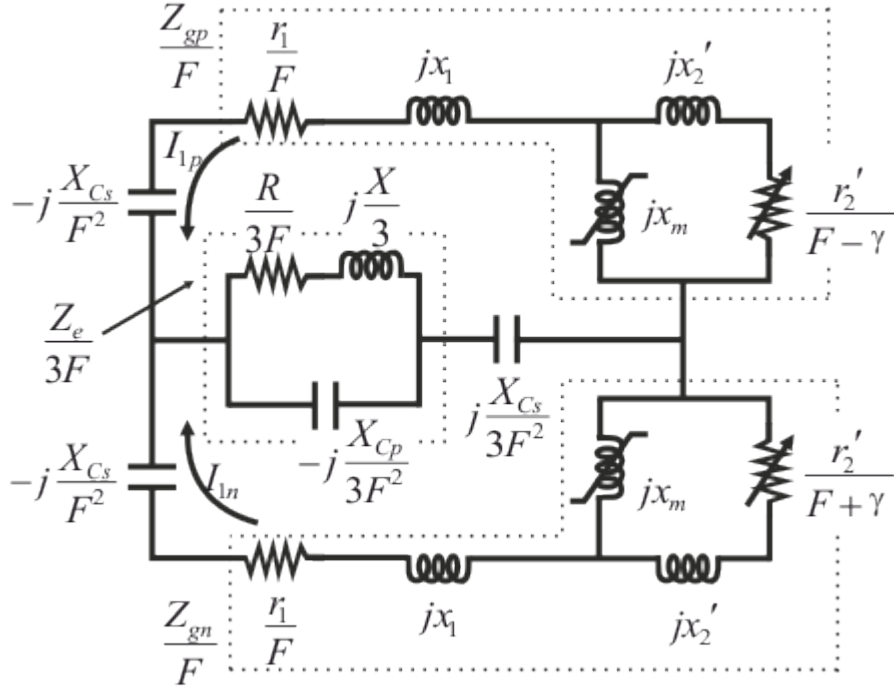
(E.4)

Stator akımlarının pozitif ve negatif bileşenlerini generatör empedansları cinsinden matrisel formda yazarsak

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}X_{cs} + Z_{gp} & \frac{1}{3}(Z_e + jX_{cs}) \\ \frac{1}{3}(Z_e + jX_{cs}) & \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}X_{cs} + Z_{gn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1p} \\ I_{1n} \end{bmatrix}$$

(E.5)

Sincap kafesli asenkron generatörün kararlı durum eşdeğer devresi Ek Şekil 2'de görüldüğü gibidir [4].



Ek Şekil 2. Asenkron generatörün eşdeğer devresi

Eşdeğer devredeki çevre eşitliği Eşitlik E.6'daki gibi olur.

$$ZI_{1p} = 0 \quad (\text{E.6})$$

Burada Z empedansı ise Eşitlik (E.7)'deki gibidir.

$$Z = \frac{Z_{gp}}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2} + \frac{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2}\right)\left(\frac{Z_e}{3F} + j\frac{X_{cs}}{3F^2}\right)}{\frac{Z_e}{3F} + j\frac{X_{cs}}{3F^2} + \frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2}} \quad (\text{E.7})$$

Analiz kolaylığı sağlamak için C_s ve C_p birbirine eşit ve C olsun. Dolayısıyla da $X_{cs} = X_{cp} = X_c$ olur. Kararlı durum kendinden uyarım şartları altında I_{1p} ifadesi sıfıra eşit olamaz. O halde $Z = 0$ olmalıdır. Kararlı durum şartları için E_g ve X_m sabit olarak seçilir.

$$f(X_c, F) = \left| \frac{Z_{gp} - j \frac{X_{cs}}{F^2} + \frac{\left(\frac{Z_{gn} - j \frac{X_{cs}}{F^2} \right) \left(\frac{Z_e + j \frac{X_{cs}}{3F^2} \right)}{\frac{Z_e + j \frac{X_{cs}}{3F^2} + \frac{Z_{gn} - j \frac{X_{cs}}{F^2}}{F}}}{F}} \right| \quad (\text{E.8})$$

Burada bilinmeyen ifadeler X_c ve F olmak üzere iki adettir.

Yukarıdaki denklem çözüldüğünde gerekli olan kondansatör değeri X_c 'den aşağıdaki denklem ile bulunur. Bu denklem Rosenbrock eksen dönüşümü metodu ile birlikte sıralı (dizili) serbest indirgeme tekniği (sequential unconstrained minimization technique (SUMT)) kullanılarak çözülür [1,2,9].

$$C_p = C_s = C = \frac{1}{2\pi f_b X_c} \quad (\text{E.9})$$

ÖZGEÇMİŞ

14.11.1980 tarihinde Polatlı'da doğdu. Liseyi Polatlı Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2003 yılında lisans eğitimini tamamladı. Aralık 2003'de Giresun Üniversitesi Giresun Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Bu görevine halen devam etmektedir. 2007 Şubat'ta Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü eğitimine başladı. Evli ve bir çocuğu bulunmaktadır. Orta derecede İngilizce bilmektedir.